1 Mark

Das Radium

Von Dr. Walter Block



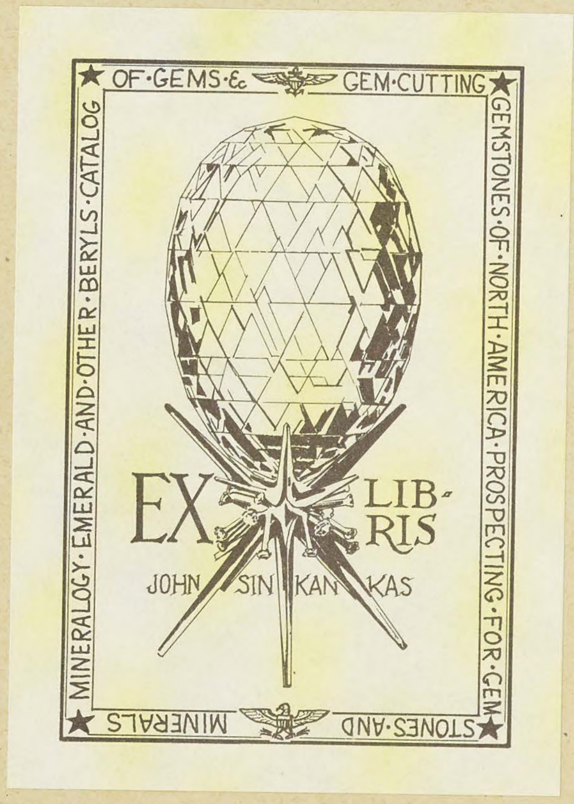


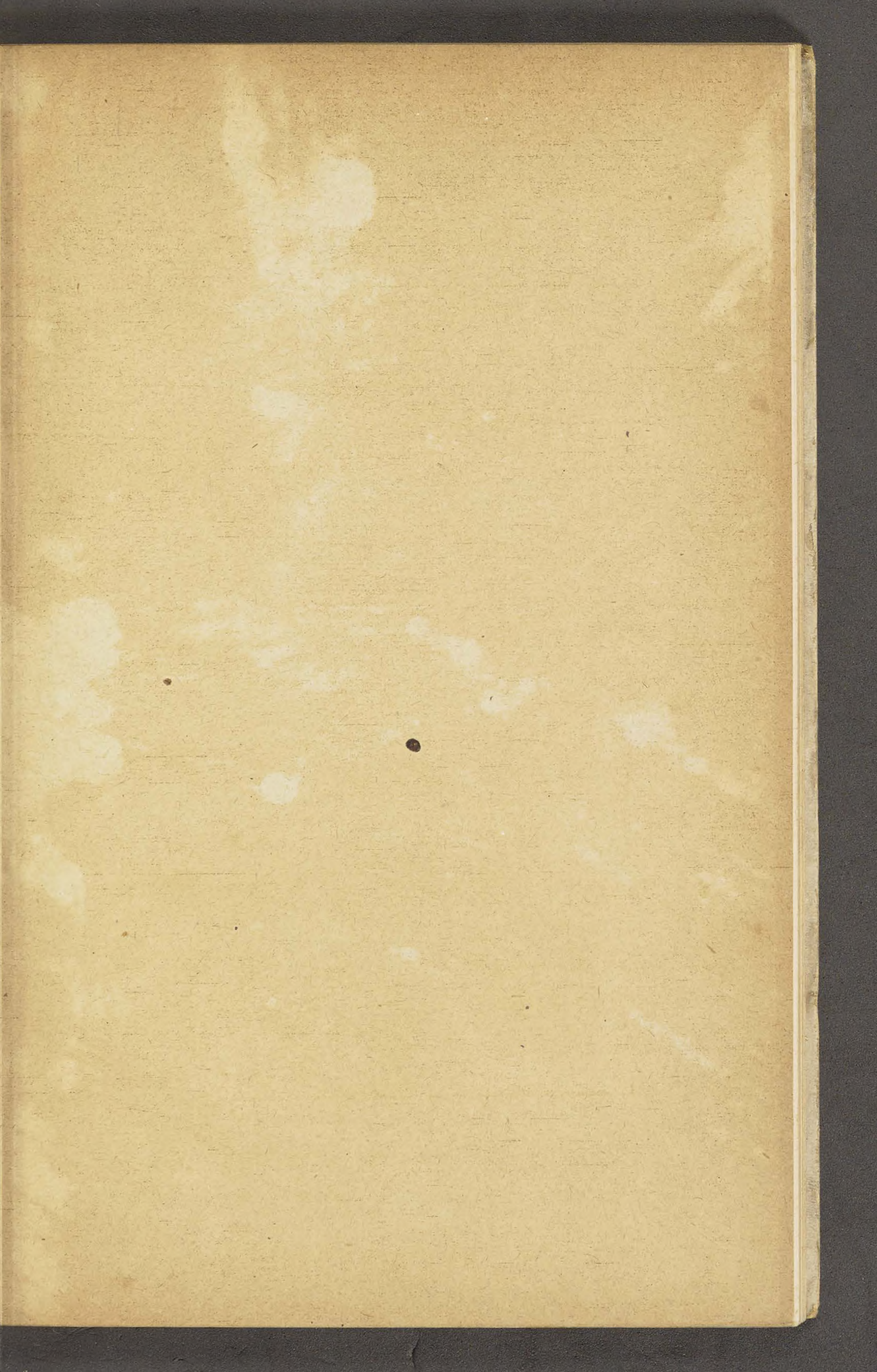
Deutsche Naturwissenschaftliche Gesellschaft
Geschäftsstelle Theod. Thomas Verlag, Leipzig.

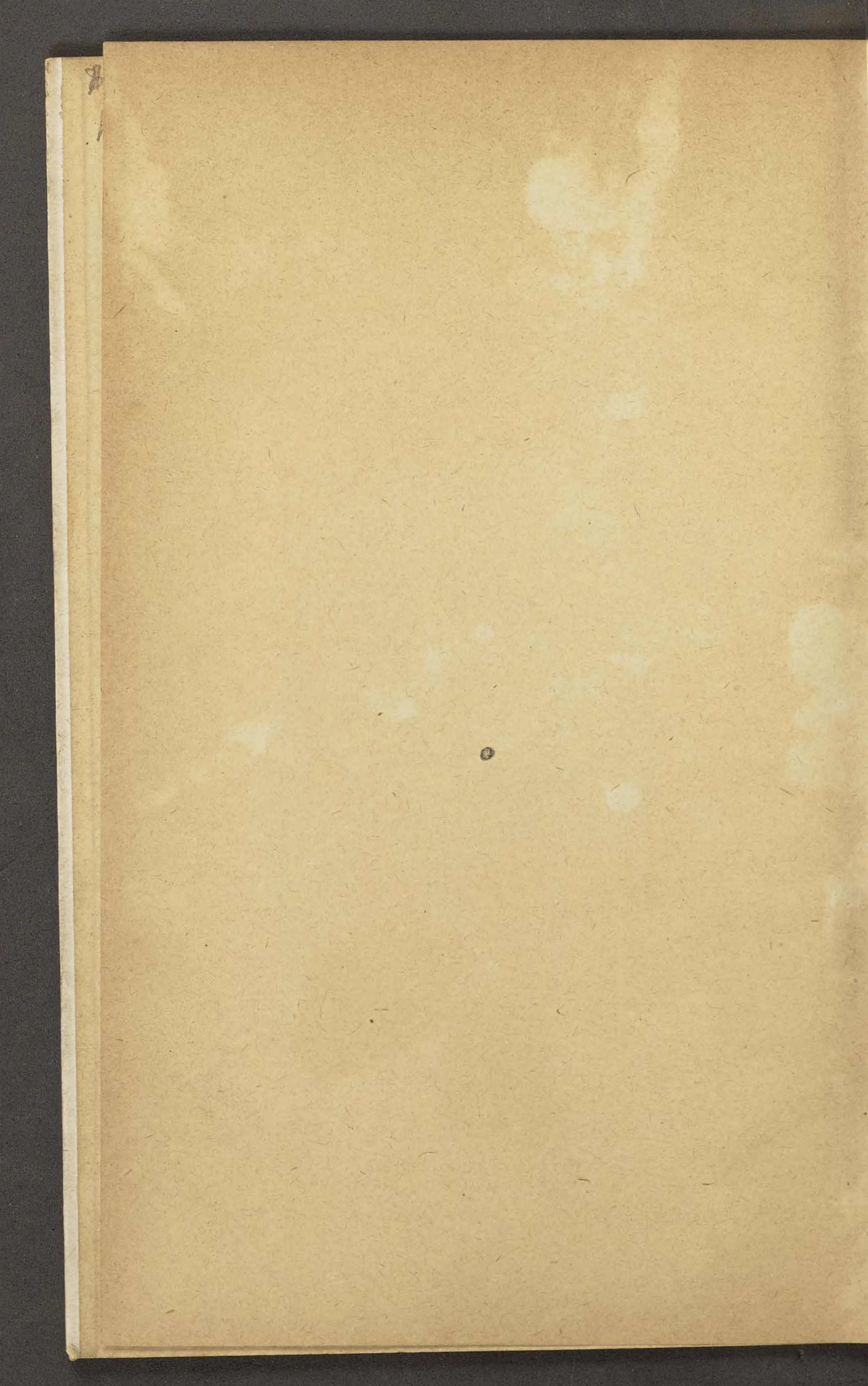
$ .70
Libris 1967
Cat

4/

From an advert. for the series,
this is one of 5 appearing
in "Jahrgang 1914."







Das Radium

und seine Bedeutung in Wissenschaft und Leben

Von

Dr. Walter Block

Mit 32 Abbildungen



Deutsche Naturwissenschaftliche Gesellschaft
Geschäftsstelle Theod. Thomas Verlag, Leipzig

Inhalt.

Sach- und Namen-Register.

Einleitung.

Man pflegt das 19. Jahrhundert als das Jahrhundert der Erfindungen oder als Jahrhundert der Naturwissenschaften zu bezeichnen. Nicht ganz mit Unrecht, wenn man die technischen Fortschritte berücksichtigt, die es uns gebracht hat, — es seien nur die Anwendungen der Elektrizität in ihren verschiedenen Formen, die chemische Industrie, insbesondere die der Farbstoffe, und die Großeisenindustrie mit ihren gewaltigen Bauten erwähnt, — und auch nicht mit Unrecht, wenn man sich vorstellt, welche Fortschritte es uns auf rein naturwissenschaftlichem Gebiet gebracht hat, — man denke nur an die Aufstellung des Gesetzes der Erhaltung der Energie, an die Entdeckung der Röntgenstrahlen, an die Entdeckung der Radioaktivität, das Auffinden einer großen Anzahl neuer weitverbreiteter Elemente.

Man darf dabei aber nicht vergessen, daß wir auch früheren Zeiten Fortschritte auf naturwissenschaftlichem Gebiet zu verdanken haben, die sich mit jenen unbedingt messen können. Die Großtat des Kopernikus, die Aufstellung des Gravitationsgesetzes durch Newton, die Erfindung der Luftpumpe durch Guericke sind Leistungen, die nicht hinter jenen zurückbleiben.

Die heutigen Zeiten unterscheiden sich insofern von denen, die hundert und mehr Jahre zurückliegen, als wir heute auf Schritt und Tritt mit technischen Dingen umgeben sind, von denen sich unsere Vorfahren noch nichts hätten träumen lassen. Die Folge davon ist, daß heute jedermann eine größere Menge naturwissenschaftlicher Kenntnisse und größeres Verständnis für naturwissenschaftliche und technische Leistungen besitzt, als es früher der Fall war. Das kann nur von Vorteil sein. Denn ein Teil der notwendigen Forschungen ist mit derart enormen Kosten verbunden, daß sie die staatlichen Forschungsinstitute mit den ihnen zur Verfügung stehenden Geldmitteln nicht immer wünschenswert durchführen können. Deswegen sind sie auf private Beihilfe angewiesen, wie sie glücklicherweise, allerdings in Deutschland erst später als in anderen Staaten, jetzt recht zahlreich zu finden ist. Auch der Steuerzahler, der, wie es leider meistens der Fall ist, nicht in der Lage ist, durch freiwillige Hergabe größerer Summen die wissenschaftliche Forschungstätigkeit zu unterstützen, wird vielleicht mit dem Anwachsen der staatlichen Aufwendungen für wissenschaftliche Institute weniger unzufrieden sein, wenn er selbst sich davon überzeugen kann, daß ihre Arbeiten nicht ganz unnütz sind.

Die nachstehenden Seiten sollen sich mit einem Kapitel der neuesten Naturwissenschaften beschäftigen, mit der Radioaktivität und mit dem hauptsächlichsten radioaktiven Stoff, dem Radium, dem berühmtesten und vielleicht geheimnisvollsten aller Stoffe. In den ersten Jahren nach der Entdeckung des Radiums und seiner verblüffenden Eigenschaften, als sich die Mitteilungen über immer neue eigenartige Eigenschaften von ihm überstürzten, schien es, als ob nun die ganze Physik anfangen müßte, alles neu zu schaffen. Die bewährtesten Gesetze schienen umgestoßen zu sein, kurz es war anscheinend eine Katastrophe, die 1898 eintrat. Nun sind rund 15 Jahre seit der Entdeckung des Radiums verflossen, und wenn man jetzt in Ruhe die Ergebnisse aller vorliegenden Untersuchungen überschaut, so muß man sagen, daß die Physik nicht in die Notwendigkeit versetzt ist, etwas wichtiges, was vor 15 Jahren als sicher erschien, aufzugeben. Das Grundgesetz der Erhaltung der Energie und der Masse bleibt immer noch bestehen, andere Gesetze ebenso, kurz, aufgegeben ist nichts; erweitert aber haben wir unsere Kenntnisse, vertieft, und nicht wenig, insbesondere auf dem Gebiet, das sich mit der Zusammensetzung und dem Aufbau der ganzen Materie beschäftigt; wir sehen immer von neuem ein, was für ein kompliziertes Gebilde ein Atom ist, aber wir wissen in seiner Beschaffenheit etwa genau so gut Bescheid, wie in unserem Planetensystem. Daß daneben noch eine Menge neuer praktischer Anwendungen des Radiums aufgefunden wurden, braucht nicht besonders erwähnt zu werden. Als einer der bedeutendsten physikalischen Fortschritte muß die Entdeckung der Radioaktivität angesprochen werden, eine neue Periode der Physik beginnt mit ihr nicht.

Tief einschneidend für alle Wissensgebiete ist die Entdeckung der Radioaktivität sicherlich; so daß manches erreicht ist, was man einige Jahre vor ihrer Entdeckung noch als unmöglich bezeichnet hätte. Aber was wird nicht alles als unmöglich bezeichnet, was später eine Selbstverständlichkeit geworden ist, die Eisenbahn, das lenkbare Luftschiff, die Flugmaschine usw. Schon Arago, dessen Hauptwirksamkeit vor etwa hundert Jahren lag, bemerkte, daß man es sich abgewöhnen müsse, bei den Naturwissenschaften von Unmöglichkeiten zu sprechen.

I. Kapitel.

Die Physik zur Zeit der Entdeckung der Radioaktivität.

Wenn wir in das Verständnis der Bedeutung der radioaktiven Erscheinungen für unsere gesamten naturwissenschaftlichen Anschauungen eindringen wollen, müssen wir uns in diesem ersten Kapitel zunächst damit beschäftigen, kurz dem Gedächtnis zu wiederholen, wie denn unsere Vorstellungen über die Art, wie alle Stoffe aus ihren Einzelbestandteilen aufgebaut sind, etwa bis zur Entdeckung des Radiums beschaffen waren.

Solche Anschauungen, die zum Teil schon so alt sind, solange die Menschheit sich überhaupt mit derartigen Fragen beschäftigt, bot uns zunächst die Chemie. Man unterscheidet zusammengesetzte Stoffe, die weitaus größte Zahl aller in der Natur vorkommenden, und Elemente, Stoffe, die durch irgendwelche Maßnahmen nicht weiter in mehrere mit verschiedenen Eigenschaften zerlegt werden können. Wasser ist ein zusammengesetzter Stoff; denn wird durch Wasser ein elektrischer Strom hindurchgeleitet, so zerspaltet es sich in zwei Gase, Sauerstoff und Wasserstoff. Diese beiden Gase verstehen wir nicht weiter zu zerlegen, wir bezeichnen sie also als Elemente. Die Luft ist ein zusammengesetzter Körper, denn wir können sie ohne Mühe in die beiden Gase Sauerstoff und Stickstoff zerteilen. Auch Stickstoff erweist sich neben Sauerstoff als ein Element. Von solchen Elementen kennen wir etwa 80. Sie bauen in unzähligen Kombinationen alle bekannten Stoffe auf.

Aber in welcher Weise geschieht das nun? Dafür gibt uns die Atomtheorie eine Erklärung. Alle gleichförmig zusammengesetzten Körper, das Wasser, das Kochsalz usw., bestehen aus einer ganz ungeheuer großen Anzahl von Molekeln (molecula = kleine Menge). So bezeichnet man die kleinsten Bausteine der gesamten Materie. Alle Wassermolekel sind untereinander gleich, alle Kochsalzmolekel ebenfalls. Später werden wir sehen, wie wir bestimmen können, wie groß eine solche Molekel bei den einzelnen Stoffen ist, wie viele in einem bestimmten Raume vorhanden sind usw.

Bei dieser Zerteilung der Materie können wir aber nicht stehen bleiben. Die Wassermolekel z. B. muß noch weiter zerlegbar sein. Und zwar in Sauerstoff und Wasserstoff, wie schon oben erwähnt. Wir sagen, die Wassermolekel ist aus Atomen von Sauerstoff und Wasser-

stoff zusammengesetzt. Die Kochsalzmolekel besteht aus einem Atom Chlor und einem Atom Natrium. Alle Molekel setzen sich aus Atomen der Elemente zusammen. Die Molekel der einzelnen Elemente bestehen aus einer gewissen Anzahl Atome gleicher Art, die der zusammengesetzten Stoffe aus mindestens zwei verschiedenen Atomen bis zu Tausenden. Die ungeheuer verschiedenen Möglichkeiten der Kombinationen von etwa 80 verschiedenen Atomen einmal untereinander, sodann noch in verschiedenen Anzahlen untereinander machen die Molekel der zusammengesetzten Körper aus. Jedes Atom eines Elementes ist jedem anderen des gleichen völlig gleich. Jedes hat ein ganz bestimmtes charakteristisches Gewicht, von natürlich unendlich kleiner Größe. Aus gewissen hier nebensächlichen Gründen setzen wir das Gewicht eines Sauerstoffatomes zu 16 an, und wenn wir dann sagen, daß das Radium das Atomgewicht 226 hat, so bedeutet das, daß ein Radiumatom $\frac{226}{16}$ mal so schwer ist als ein Sauerstoffatom. Ist das Atomgewicht von Wasserstoff 1, so heißt das, ein Wasserstoffatom wiegt $^1/_{16}$ von dem eines Sauerstoffatomes, und ein Radiumatom ist 226 mal so schwer wie ein Wasserstoffatom. Aus weiteren praktischen Untersuchungen erfahren wir dann weiter, daß ein Sauerstoffatom sich stets mit zwei Wasserstoffatomen vereinigt, ein Kohlenstoffatom mit vier, ein Chloratom mit einem usw., was man als die Wertigkeit der Elemente bezeichnet, und wir haben das allernotwendigste zusammen, was die Chemie zur Grundlage anwendet, auf der sie ihre weitgehenden Erfolge sowohl im Auffinden neuer Elemente, also im Zerlegen der zusammengesetzten Stoffe, als auch im Aufbau zusammengesetzter Stoffe aus den Elementen errungen hat.

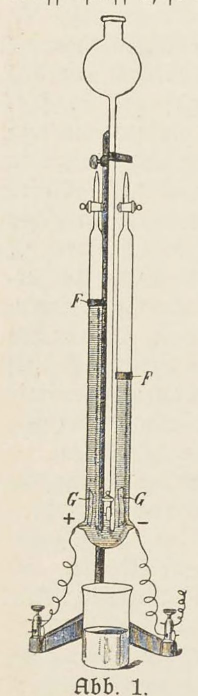
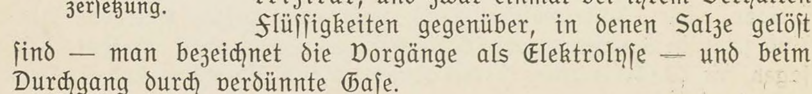


Abb. 1. Elektrolytischer Apparat zur Wasserzersetzung.

Sind wir damit aber nun am Ende der Zerteilung der Materie? Wie gesagt, die Chemie braucht für jene erwähnten Probleme keine weitere Zerteilung vorzunehmen. Für andere dagegen konnte sich weder die Chemie damit begnügen, und noch weniger die Physik. Es genügt nicht, das Atom als einfachen Baustein aller Materie anzunehmen (ebensowenig wie die Biologie die Zelle als ein einfaches Gebilde ansieht). Man sah bald ein, daß das Atom ein äußerst kompliziertes Gebilde sein müsse, und dazu führte uns die Elektrizität, und zwar einmal bei ihrem Verhalten Flüssigkeiten gegenüber, in denen Salze gelöst


sind — man bezeichnet die Vorgänge als Elektrolyse — und beim Durchgang durch verdünnte Gase.

Die Elektrolyse zunächst. Lösen wir Kochsalz, Chlornatrium, in Wasser auf, und senden wir durch diese Lösung einen elektrischen Strom, so scheidet sich an dem einen Pol (G) unter geeigneten Versuchsbedingungen, in ähnlichen Apparaten, wie sie Abbildung 1 darstellt, Chlorgas aus, an dem anderen (G) Natrium. Ähnliches tritt bei anderen elektrolytischen Versuchen ein. Die Vorgänge der Elektrolyse führen uns zu der Annahme, daß in dieser Salzlösung nicht nur Wassermolekel und Chlornatriummolekel gemischt vorkommen, sondern daß auch ein Teil der Chlornatriummolekel durch das Lösungsmittel — hier also das Wasser — gespalten ist, also in Chloratome und Natriumatome; aber weiter, es handelt sich nicht um reine Atome bekannter Art, sondern diese hier auftretenden Atome sind elektrisch geladen, und zwar sind die Chloratome negativ elektrisch geladen, die Natriumatome positiv. Wir können sogar weiter gehen und messend feststellen, wie groß diese elektrische Ladung bei dem einzelnen Atom ist, und wir finden dafür eine ganz winzig kleine Elektrizitätsmenge negativer bzw. positiver Art. Derartige mit diesen Elektrizitätsmengen geladene Atome bezeichnet man als Jonen und unterscheidet positive und negative Jonen, in jenem Fall also positive Natriumionen und negative Chlorionen.

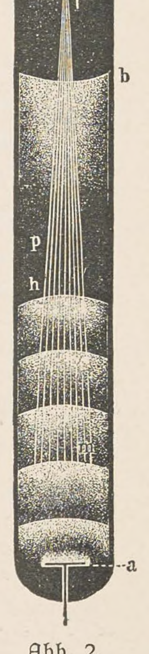


Abb. 2. Kathodenstrahlenröhre.

Für unsere Zwecke sind später von größerer Wichtigkeit jene andere oben erwähnte Klasse von Erscheinungen beim Durchgang von Elektrizität durch Gase. Jeder der Leser wird wohl die glänzenden, vielgezeigten farbenprächtigen Lichterscheinungen kennen, die in den Geißlerröhren, Röntgenröhren usw. auftreten, Erscheinungen also beim Durchgang elektrischer Ströme durch verdünnte Gase. Eine der normalen Erscheinungen, die sich bei solchen Versuchen zeigt, ist folgende, wie sie die Abbildung 2 darstellt.

Von dem positiven Pol (a), der Anode, breitet sich eine geschichtete Lichtsäule aus, deren Länge und Gestalt von der Form der Röhre abhängt; ihre Farbe ist in verdünnter Luft z. B. rot. Von dem negativen Pol (k), der Kathode, ist sie durch einen dunkeln Raum (p) geschieden, während an ihr selbst das leuchtende blaue „negative Glimmlicht“ (b) auftritt. Durch geeignete Vorkehrungen kann man es nun erreichen, daß man die beiden Pole einander beliebig nähert, und dann wird man die merkwürdige Erscheinung beobachten, daß die positive Lichtsäule ihre Länge ändert, daß aber die Erscheinungen um den negativen Pol ganz unverändert erhalten bleiben. Sie sind also das wesentliche, die negative Elektrizität ist also merklich bevorzugt. Ja, auch in anderem Sinne, verringert man den Gasdruck in der Röhre immer mehr, so treten die Erscheinungen am positiven Pol immer weiter zurück, das negative Licht breitet sich weiter aus, bis es endlich mit

dem geisterhaft grünlichen oder bläulichen Schimmer, den wir an jeder Röntgenröhre sehen können, die ganze Röhre erfüllt. Diese von der Kathode ausgehenden Lichtstrahlen bezeichnen wir als Kathodenstrahlen, und wenn sie auf die Glaswand der Röhre auftreffen oder auf einen anderen festen Körper, so gehen an dieser Stelle neue unsichtbare Strahlen aus, die wir nach ihrem Entdecker als Röntgenstrahlen bezeichnen, jene Strahlen mit der wunderbaren Eigenschaft, viele für unser Auge undurchsichtige Stoffe zu durchdringen, und deren Inneres durch ihre Einwirkung auf die photographische Platte oder auf andere Weise im Schattenbild sichtbar zu machen. Bei einer Röntgenröhre ist der positive Pol an sich (er muß selbstverständlich zur Stromzuleitung vorhanden sein) recht bedeutungslos, und seine Lage kommt für eine günstige Erzeugung der Röntgenstrahlen kaum in Frage.

Bei der oben beschriebenen Geißlerröhre entstanden die Lichterscheinungen zwischen den beiden Polen. Führen wir die Röhre nun so aus, daß wir das Kathodenblech mit Löchern versehen, so können wir bei geeigneten Versuchen nachweisen, daß sich in dem Raum außerhalb der beiden Pole andere Lichtstrahlen von diesen Löchern ausgehend fortpflanzen, die man nach ihrer Entstehung als Kanalstrahlen bezeichnet.

Nun handelt es sich darum, diese Strahlenarten, die Kathodenstrahlen mit den durch sie hervorgerufenen Röntgenstrahlen, und die Kanalstrahlen, genauer zu untersuchen. Dabei stellt sich folgendes heraus: Zunächst fand man, daß beide Strahlenarten aus äußerst kleinen Partikelchen bestehen, die von den Polen, also der Kathode bzw. Anode mit sehr großen Geschwindigkeiten fortgeschleudert werden. Diese kleinsten Teilchen sind bei den Kanalstrahlen zum allergrößten Teil positiv elektrisch geladen, einige ungeladen und einige wenige negativ geladen. Wir können bestimmen, welcher Art diese Teilchen sind, und wie groß ihre Ladungen sind, und da finden wir, daß es einzelne Atome des Gases sind, das gerade in der Röhre enthalten ist; und ihre Ladungen ergeben sich als ebenso groß wie die bei der Elektrolyse für die Jonen gefundenen. Hier haben wir also genau entsprechende Verhältnisse. Und von besonderer Wichtigkeit ist es dabei, daß niemals andere Ladungen auftraten, als gerade genau diese „Elementarladung" oder ein ganzes Vielfaches von ihr; dagegen niemals Bruchteile von ihr; diese Elementarladung ist also die kleinste jemals vorkommende Elektrizitätsmenge.

Ähnlich finden wir bei den Kathodenstrahlen, daß sie negativ geladene Partikelchen sind. Aber eine wichtige Unterscheidung muß man gegenüber den Kanalstrahlen machen. Diese Kanalstrahlenpartikelchen gehören den bekannten chemischen Elementen an, die der Kathodenstrahlen nicht; sie stellen einen neuen Stoff dar, der aus der Kathode fortgeschleudert wird. Als neues Element kann man diese Partikelchen dagegen nicht bezeichnen, weil man keinen materiellen Körper aus ihnen zusammenbauen kann. Sie kommen stets nur mit dieser einen ganz bestimmten negativen Ladung vor, die ebenfalls

immer genau von der gleichen Größe ist, wie jene oben erwähnte. Ihr materieller Teil, dessen Größe sich nur als der 1800. Teil eines Wasserstoffatomes berechnen läßt, von dem man überdies überhaupt nicht sagen kann, ob man ihn noch als materiell ansehen kann, ist jedenfalls ganz bedeutungslos; man bezeichnet ein einzelnes solches Teilchen als ein Atom Elektrizität, als ein „Elektron". So ist man auch zu einer atomistischen Auffassung der Elektrizität gelangt. Bestimmte positive elektrische Ladungen, positive Elektronen in gleicher Art wie die negativen, kennt man nicht, und wir können deswegen die wichtigsten Grundsätze der heutigen Elektronentheorie in Kürze so zusammenfassen:

Alle Atome der materiellen Elemente bestehen aus den eigentlichen materiellen Atomen mit einem oder mehreren eng mit ihnen verbundenen Elektronen. Ein ungeladenes, neutrales Atom besitzt die normale Anzahl Elektronen. Die Zahl dieser mit einem Atom verbundenen Elektronen kann künstlich verändert werden; sind mehr Elektronen als normal vorhanden, so haben wir negativ elektrisch geladene Atome, negative Ionen vor uns, sind es zu wenig, positiv elektrisch geladene, positive Ionen. Zwei oder mehrere solcher Atome können sich zu einer Molekel vereinigen, die dann auch elektrisch neutral sein kann. Die Elektrizitätsmenge eines Elektrons ist stets negativer Art und hat eine ganz bestimmte Größe. Bruchteile dieser Größe kommen nicht vor. Es gibt nur eine Elektrizitätsart, die negative, die positive besteht darin, daß die notwendige, sonst mit einem Atom verbundene Elektronenanzahl nicht vorhanden ist. Jeder elektrische Strom, gleichgültig wo er auftritt, besteht in einer Bewegung dieser Elektronen.

Das sind in alleräußerster Kürze die Grundlagen der Elektronentheorie. Sie werden in dieser Form ohne jede weitere Erläuterung als recht eigenartig und den festeingewurzelten Anschauungen über elektrische Ströme recht widersprechend erscheinen. Ihre nähere Begründung werden sie indessen in späterem finden. Denn alle Erscheinungen der Radioaktivität sind im Grunde genommen nichts weiter wie Stützen der Elektronentheorie.

Nur auf einen Punkt sei jetzt schon hingewiesen. Die negative Elektrizität stellt sich in den Erscheinungen der Gasentladungen als „die" Elektrizität dar, welche die wichtigsten Erscheinungen hervorruft, die wir als elektrische bezeichnen. Die sogenannte positive Elektrizität spielt dabei gewissermaßen die Rolle, als ob von der negativen Elektrizität, ganz grob gesprochen, nur zu wenig vorhanden ist. Zu Beginn der Forschungen über Elektrizität bezeichnete man zufälligerweise die beim Reiben von Glas entstehende Elektrizität als positive, und die beim Reiben von Harz entstehende als negative. Weitere tiefergehende Bedeutung ist diesen Worten nicht beizumessen. Dann brachte es naturgemäß der Sprachgebrauch mit sich, daß man bei elektrischen Strömen die Richtung des „positiven" Stromes allen Sätzen, Erläuterungen usw. zugrunde legte. Jetzt stellt sich heraus, daß man damals zufällig eine

unglückliche Wahl getroffen hat. Der „Elektronenstrom“ läuft gerade in der entgegengesetzten Richtung wie der sonst übliche Strom. Es handelt sich dabei nur um eine Bezeichnungsweise, weiter nichts. Größere Änderungen in Gesetzen usw. entstehen dadurch nicht.

Wir wollen damit unser erstes Kapitel abschließen. Es soll nur eine Übersicht über die zur Zeit der Entdeckung der Radioaktivität bekannten Erscheinungen und Anschauungen geben. Wir werden noch an recht vielen Stellen Gelegenheit haben, das hier Vorgetragene genauer zu besprechen, und auch, was wichtiger ist, Beweise für unsere Behauptungen beizubringen.

II. Kapitel.

Die Entdeckungsgeschichte der radioaktiven Stoffe.

Beschäftigen wir uns nun zunächst mit der Frage, wie die Entdeckung der radioaktiven Stoffe erfolgte, welche Wege man einschlug, um sie rein darzustellen, und endlich, welche Stoffe man fand.

Es war bald nach der Entdeckung der Röntgenstrahlen im Jahre 1895. Man sah, daß unter der Wirkung der von der Kathode einer Röntgenröhre ausgehenden Strahlen die davon getroffene Glaswand hell leuchtete, fluoreszierte, und daß von diesen fluoreszierenden Stellen die als Röntgenstrahlen bezeichnete Strahlung mit ihren rätselhaften Eigenschaften ausging. (Es sei hier eine Bemerkung anderer Art eingeschaltet: Fluoreszieren nennt man eine Eigenschaft einer Reihe von Stoffen, die darin besteht, daß sie eine bestimmte Lichtfarbe aussenden, die anders ist, als die Farbe des Lichtes, das sie trifft. Stellen wir uns z. B. eine Auflösung von Blattgrün im Alkohol her, was ganz leicht zu machen ist, so erhält man eine intensiv grüne Flüssigkeit; läßt man aber nun in diese Flüssigkeit einen Sonnenstrahl fallen, so sieht sie an den von ihm getroffenen Stellen nicht mehr grün aus, sondern purpurrot. Das ist die Fluoreszenzfarbe des Blattgrüns. Hüllen wir eine Röntgenröhre in schwarzes Papier, so sehen wir von ihrem Leuchten nichts mehr. Nur die unsichtbaren Röntgenstrahlen durchdringen es und vermögen den Röntgenschirm, der zur Sichtbarmachung der Schattenbilder dient, zum Fluoreszieren zu bringen, er leuchtet gelblich grün; derartige Vorgänge bezeichnet man als Fluoreszenz. Nicht zu verwechseln mit Phosphoreszenz, dem Nachleuchten, einer Eigenschaft besonders von Phosphor und vielen anderen Stoffen, die, wenn sie dem Tageslicht ausgesetzt gewesen sind, auch nachher im Dunkeln eine Zeit lang Licht von sich geben.)

Wie gesagt, man versuchte aufzuklären, ob diese Fluoreszenzstellen die Veranlassung zu den Röntgenstrahlen wären. Zu diesem Zwecke wurden fast alle bekannten fluoreszierenden Stoffe untersucht. Man legte sie auf eine in schwarzes Papier gepackte photographische Platte und belichtete sie. Das zur Belichtung dienende Licht konnte wegen des schwarzen Papieres auf die Platte nicht einwirken, aber etwaige hervorgerufene Röntgenstrahlen mußten sie schwärzen. Aber alles blieb fast erfolglos. Nur bei Stoffen, die Uran enthielten, war eine Wirkung, wie Becquerel fand, feststellbar. Aber auch da ergab eine genauere Untersuchung, daß der Vorgang anders sein müsse. Denn auch nicht fluoreszierende Uranerze schwärzten die Platte, und auch



Abb. 3. Pechblende.
(Nach Soddy.)

solche, die lange Zeit im Dunkeln gelegen hatten, also auch nicht mehr phosphoreszieren konnten.

Damit war festgestellt, daß die Wirkung auf die photographische Platte entweder eine Eigenschaft von Uran sein müßte oder eines mit ihm eng zusammengehörigen Stoffes. Und hieran knüpft dann die weitere Untersuchung an. Als Ausgangsmaterial wählte man die Pechblende, ein in größeren Mengen in Joachimsthal im Erzgebirge vorkommendes Mineral, das etwa zur Hälfte aus Uran besteht. Die Abb. 3 zeigt ein solches Stück Pechblende, das auch im Dunkeln ständig ein schwaches Licht aussendet, so daß es möglich ist, es im eigenen Licht zu photographieren, wie es auf Abb. 4 zu sehen ist. Die Abb. 5 zeigt die Wirkung eines andern solchen Stückes auf eine photographische Platte, wenn man es unmittelbar auf sie herauflegt; man sieht ganz deutlich, daß in dem Stück Adern verlaufen, die eine ganz besonders starke Einwirkung auf die Platte ausüben, während andere

Stellen fast wirkungslos bleiben. Man vergleiche auch die Ähnlichkeit mit der Leuchtwirkung bei Abb. 4.

Die nähere Untersuchung der Pechblende ging dann so vor sich, daß man sie verschiedenen chemischen Einwirkungen unterwarf und sie dadurch in mehrere chemisch ungleichartige Teile trennte. Die einzelnen so erhaltenen Teile untersuchte man auf ihre Strahlen aussendende, als radioaktiv bezeichnete Wirkung. Man tat das nach später zu besprechenden Methoden, nicht nach der mittels der photographischen Platte, die ja in diesem Falle wohl das Vorhandensein einer Strahlung nachweisen ließ, aber, was wichtiger war, nicht ihre Stärke zu messen gestattete. Auf derartigen Wegen gelangte man zu einem, wenn

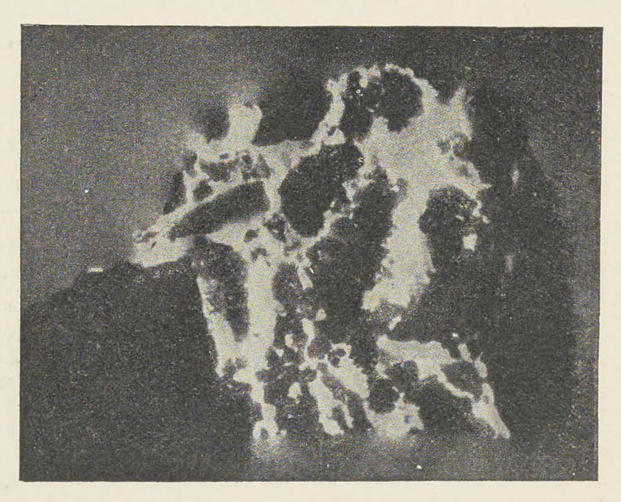


Abb. 4. Pechblende (Abb. 3) im eigenen Lichte photographiert.
(Nach Soddy.)

man so sagen darf, „Extrakt" aus der Pechblende, das stärker radioaktiv war, als eine gleiche Menge der Ausgangssubstanz. Diesen behandelte man immer weiter und schied immer mehr Teile aus, die nicht radioaktiv waren, bis man endlich erkannte, daß die Wirkung nicht vom Uran der Pechblende, oder einem anderen in der Pechblende vorkommenden bekannten Stoff ausgeht, sondern von einem neuen Stoff, der chemisch dem Barium sehr ähnlich sein müsse. Nach vielen Bemühungen gelang es endlich Frau Curie in Paris, eine Mischung dieses neuen Stoffes mit Bariumchlorid herzustellen, die etwa eine Million mal stärker radioaktiv war, als die Ausgangssubstanz. Dieser neue Stoff wurde als Radium bezeichnet.

Zur Beleuchtung der zu überwindenden Schwierigkeiten sei noch näher auf die Methode der Darstellung eingegangen.

Die Pechblende enthält etwa 75 Prozent Uranoxyd, einer Verbindung des Urans mit Sauerstoff. Bei der in Joachimsthal im

Erzgebirge, dem Hauptfundort der Pechblende in Mitteleuropa, stattfindenden fabrikmäßigen Bearbeitung wird der größte Teil des Urans abgeschieden und weiter verarbeitet. Die fast wertlosen Rückstände wurden dann von Frau Curie, ihrem Gemahl Pierre Curie und unter Mithilfe von Bémont weiter untersucht. Ganz gewaltige Mengen waren davon erforderlich. 1000 Kilogramm Uranrückstände, die fast alle bekannten Metalle in kleinen Mengen bis zu Spuren herab enthielten, wurden chemisch behandelt, bis sich endlich ein Rest von etwa 10 Kilogramm Bariumsulfat ergab, das rund 50mal stärker radioaktiv war, als das metallische Uran. In diesen 10 Kilogramm mußte der neue Körper enthalten sein. Sie wurden weiter behandelt, bis man endlich eine Lösung hatte, in der nur noch Barium und jenes Radium in den chemischen Formen als Bariumchlorid und Radiumchlorid enthalten war. Es zeigte sich, daß beide chemisch so ähnlich waren, daß ihre Trennung gewaltige Schwierigkeiten bot. Endlich fand sich ein geeigneter Weg. Wenn man diese Lösung ganz vorsichtig eindampfte, so schieden sich, wie man es bei jeder Salzlösung sehen kann, Kristalle aus, aber mehr Radiumchloridkristalle als solche von Bariumchlorid. So wurden die Kristalle wieder stärker radioaktiv als die Lösung. Der nicht eingedampfte Teil der Lösung, der also überwiegend Bariumchlorid enthielt, wurde weggegossen, die Kristalle gesammelt, nun in Wasser aufgelöst und wieder eingedampft; die jetzt entstehenden Kristalle bestanden wieder aus noch mehr Radiumchlorid als Bariumchlorid usw. Endlich nach vielfachen Umkristallisationen erhielt man etwa ein Zehntel Gramm Radiumchlorid mit nur geringen Beimengungen von Bariumchlorid, das etwa eine Million Mal stärker radioaktiv war als das ursprüngliche Uran. Und nun vergegenwärtige man sich noch die geleistete Arbeit; aus 1000 Kilogramm erhielt man ein Zehntel Gramm Radiumchlorid, also etwa den zehnmillionsten Teil der Ausgangsmenge! Man kann daraus wohl ermessen, welche Kosten mit der Darstellung des reinen Radiums verbunden sind!

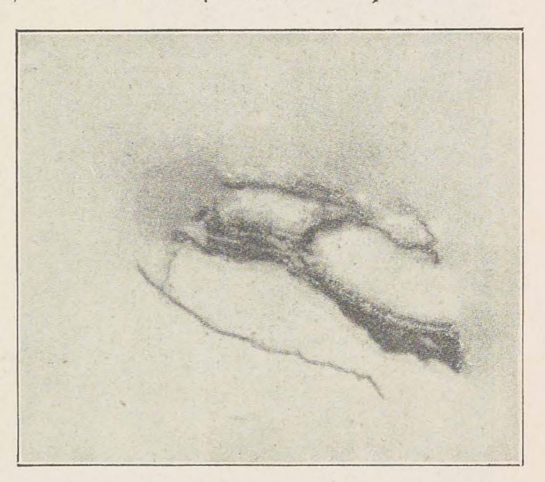


Abb. 5. Wirkung der Pechblende auf die photographische Platte.
(Nach Curie.)

Auf diesem Wege etwa ist das Ehepaar Curie zur erstmaligen Dar-

stellung stark radioaktiver Substanzen gelangt, und es ist im wesentlichen auch heute noch der gleiche Weg, den man zur fabrikmäßigen Darstellung dieser Stoffe einschlägt. Man erhält so mehr oder weniger reines Radiumchlorid oder Radiumbromid, wobei also das Radium selbst chemisch verbunden mit Chlor oder Brom ist. Erst nach langen Bemühungen ist es 1910 Frau Curie und Debierne gelungen, Radium selbst unverbunden darzustellen. Auf die vielen Schwierigkeiten der Reindarstellung und der angewandten Methode kann hier nicht eingegangen werden, es sei nur bemerkt, daß sie elektrolytischer Art war; ähnlich

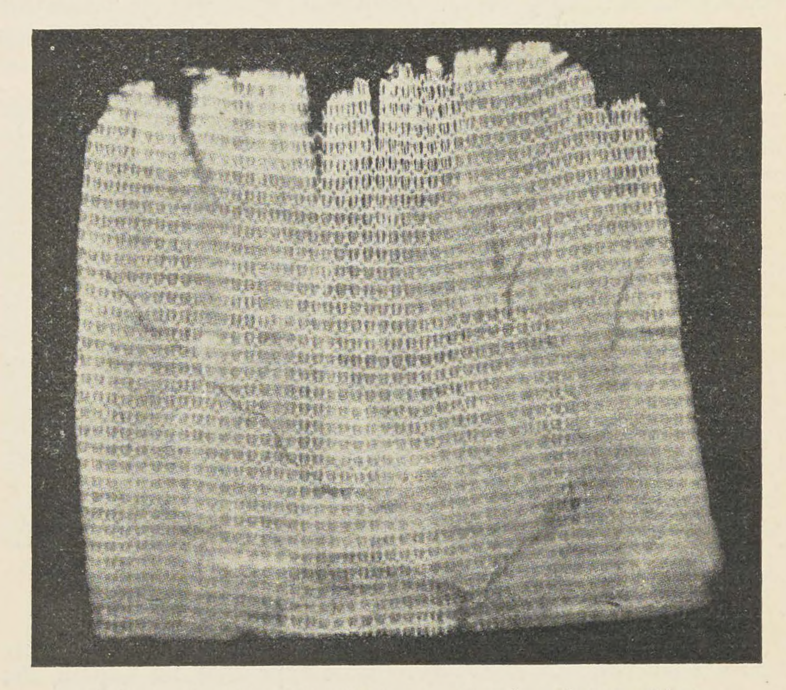


Abb. 6. Auerstrumpf, mit eigenen Strahlen photographiert.
(Nach Soddy.)

wie man Natriumchloridlösungen unter geeigneten Bedingungen durch den elektrischen Strom in Natrium und Chlor elektrisch zerlegen kann, kann man auch Radiumchlorid, allerdings mit sehr viel größeren Schwierigkeiten, behandeln. Es zeigte sich, daß Radium ein weißes silberglänzendes Metall ist, das bei 700° schmilzt. An der Luft läuft es sofort schwarz an. Ein auf Papier gelegtes Splitterchen erzeugt dort eine Schwärzung wie einen Brandfleck. Auf Wasser geworfen, zersetzt es dieses sehr energisch in Wasserstoff und Sauerstoff, genau so wie es Natrium oder Kalium tut. Weitere besondere Eigenschaften, die von denen der üblichen Radiumverbindungen ab-

weichen, weist es anscheinend nicht auf, so daß es keine größere Bedeutung erlangt hat.

Sehr bald nach der Darstellung der Radiumverbindungen entdeckte man, daß diese nicht die einzigen radioaktiven Körper sind. Jede Radiumverbindung sonderte, so fand man, in geringen Mengen ein Gas ab, das ebenfalls radioaktiv war. Man kann dieses Gas vollständig aus den festen radiumhaltigen Stoffen durch Ausglühen und aus den Lösungen durch Kochen austreiben und es genauer untersuchen. In den ursprünglichen Verbindungen bildet es sich immer wieder neu. Seine Radioaktivität erweist sich aber als nur von kurzer Dauer. Man bezeichnet dieses Gas als Radiumemanation.

Ungefähr gleichzeitig mit der Entdeckung der Radioaktivität der Uranmineralien wurde auch festgestellt, daß die Thoriummineralien radioaktiv sind. Der Entdecker dieser Radiostoffe war G. C. Schmidt. Die Thoriummineralien werden industriell viel dazu verarbeitet, um die Stoffe zu gewinnen, mit denen die Glühkörper für Gasglühlicht getränkt werden, um ihnen Leuchtkraft zu geben. Daß die Thoriumverbindungen radioaktiv sind, zeigt die Abb. 6; sie ist erhalten, indem man einen Strumpf für Gasglühlicht auf eine photographische Platte ausbreitete. Das Gewebe ist mit Thoriumlösungen getränkt, und die von diesen ausgehenden Strahlen wirken auf die Platte, so daß der Strumpf sich infolge seiner natürlich immer sehr schwachen Radioaktivität in einigen Tagen selbst photographiert. Auf ähnlichen Wegen wie beim Radium gelang es hier vorwärts zu kommen. In den Fabriken für Glühkörper werden die Thoriumerze gereinigt und möglichst reines Thorium aus ihnen abgeschieden. Die Abfälle werden jetzt auf radioaktive Stoffe hin verarbeitet. Erst vor kurzer Zeit, im Jahre 1907, gelang es O. Hahn, aus diesen Stoffen einen sehr stark radioaktiv wirkenden Körper herzustellen, das Mesothorium, das neuerdings zu besonderer Berühmtheit gelangt ist, und daneben noch Radiothorium. Eine Reindarstellung des Mesothoriums, das tatsächlich aus zwei getrennten Stoffen besteht, ist bisher noch nicht gelungen, vielmehr enthält es immer noch recht starke Radiumbeimengungen.

Aber auch bei der Untersuchung der Uranerze, die, wie wir oben erwähnten, fast alle bekannten Metalle in geringen Beimengungen enthalten, hat eine genauere Untersuchung noch mehr zutage gefördert. Eine Prüfung des aus der Pechblende abgeschiedenen Wismuts lieferte einen neuen radioaktiven Stoff, das von Frau Curie entdeckte Polonium; Marckwald gelang es später, es in größeren Mengen darzustellen. Aus 15000 Kilogramm Joachimsthaler Pechblende erhielt er drei Milligramm; so ist bei radioaktiven Stoffen eine „größere Menge" aufzufassen. Indessen ist Polonium so stark radioaktiv, daß bereits ein hundertstel Milligramm genügt, um einen fluoreszierenden Schirm derart zum Leuchten zu bringen, daß es ein Zuschauerkreis von mehreren hundert Personen gleichzeitig wahrnehmen kann!

Endlich entdeckte Debierne als Begleiter des Eisens gleichzeitig

mit Giesel das Aktinium, manchmal auch als Emanium bezeichnet. Es ist ebenfalls äußerst stark radioaktiv.

Diese historische Übersicht gibt nur die allerwichtigsten radioaktiven Substanzen an, die im Laufe von etwa 15 Jahren irgendwie dargestellt sind. Eine große Anzahl anderer werden wir später in systematischer Zusammenstellung kennen lernen. Hier wollen wir nur fürs erste kurz auf einige allgemeine Gesichtspunkte zur Bewertung dieser Entdeckungen hinweisen.

Wie faßten wir bisher den Begriff eines chemischen Elementes auf? Wir bezeichneten als chemisches Element einen solchen Stoff, der zunächst selbstverständlich in sich einheitlich ist und durch irgendwelche chemische (z. B. Einwirkung von Säuren usw.) oder physikalische (z. B. Einwirkung eines elektrischen Stromes) Vorgänge nicht in zwei oder mehrere verschiedene Stoffe zerlegt werden kann. Das ist im Grunde genommen das wichtigste Kennzeichen eines chemischen Elementes. Dazu können wir aber noch gewisse andere rechnen. So muß jedes Element ein bestimmtes für sich charakteristisches Spektrum im Spektralapparat geben. Es muß ganz bestimmte Fraunhofersche Linien aufweisen in bestimmter Lage, die für dieses kennzeichnend sind, und es von andern Linien, die andere Stoffe und andere Elemente geben, deutlich zu unterscheiden gestatten. Endlich muß jeder Stoff, den wir als Element ansprechen, ein ganz bestimmtes Atomgewicht haben. Und ferner muß er die selbstverständliche Grundannahme für ein Element erfüllen, daß er, wenn wir ihn eine bestimmte Zeitlang ruhig liegen lassen, ohne ihn etwaigen Einflüssen von außen auszusetzen, unverändert bleibt.

Da haben wir nun zu prüfen, ob die neu entdeckten radioaktiven Stoffe diesen Eigenschaften entsprechen, ob wir sie als Elemente anzusehen haben, oder als zusammengesetzte Stoffe. Wir wollen hier nur die Ergebnisse zusammenstellen, so daß wir einzelnes, das noch genauer behandelt werden muß, vorweg nehmen.

Als erste Bedingung dafür, daß wir einen Stoff als Element anerkennen, haben wir ausgesprochen, daß wir ihn mit unsern Hilfsmitteln nicht in andere Stoffe zerlegen können. Das ist gleich die eine Bedingung, die bei den radioaktiven Stoffen nicht ohne weiteres zutrifft. Wir wissen heute, daß alle solche Stoffe sich mehr oder weniger schnell in andere verwandeln, die ganz andere Eigenschaften haben. Das feste metallische Radium verwandelt sich zum Beispiel in ein Gas, also in einen ganz andersartigen Körper. Genau so wie hier müßten wir also sagen, die radioaktiven Stoffe sind keine Elemente, denn die einzelnen Molekel lösen sich auf, sie zerfallen und verwandeln sich dabei in zwei neue Molekel, diese zerfallen wieder in andere Stoffe usw. Aber einen Umstand muß man dagegen halten: Wenn auch dieser Zerfall der einzelnen Molekel existiert, so haben wir mit unsern Hilfsmitteln nicht den geringsten Einfluß auf ihn. Es sind vielfach Versuche angestellt, um durch äußere Hilfsmittel die Geschwindigkeit des Zerfalls zu beeinflussen. Man hat die Stoffe

stark erhitzt, abgekühlt, unter hohen Druck gesetzt usw., es hat nichts geholfen; die Geschwindigkeit des Zerfalls bleibt für die einzelnen Molekelarten unveränderlich. Es liegt nicht in unserer Macht, den Zerfall aufzuhalten oder zu beschleunigen.

Wir müssen deswegen mit Rücksicht darauf den Begriff eines Elements etwas erweitern. Jeder radioaktive Stoff ist nach vorstehendem zunächst als Element aufzufassen, da er, selbstverständlich nur sein unzerfallener Teil, ein einheitlicher Stoff ist, den wir mit unsern Hilfsmitteln nicht zerlegen können. Unsere Kenntnis, daß er sich ohne unser Zutun selbst zerlegt, darf unser Urteil über seine elementaren Eigenschaften nicht beeinflussen. Ein Element ist also nur ein Stoff, den wir nicht weiter zerlegen können; daß er sich selbst in zwei Stoffe,

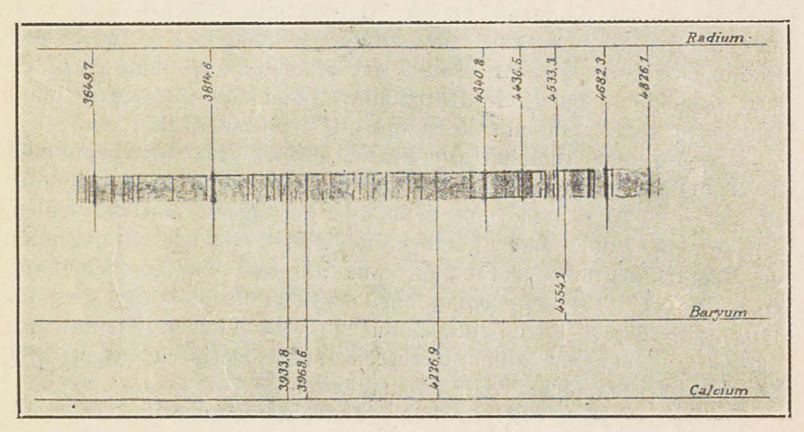


Abb. 7. Spektrum des Radiums.
(Nach Curie.)

die wiederum elementare Eigenschaften haben, zerlegt, tut nichts zur Sache.

Auch die Bedingung, daß ein sogenanntes Element im Laufe der Zeit unverändert bleibt, muß aufgegeben werden. Von einem Gramm Mesothorium ist nach $5^1/_2$ Jahren nur noch ein halbes Gramm übrig. Der Rest hat sich verändert und verschwindet allmählich, d. h. zerfällt in andere, zunächst gasförmige und dann wieder feste Stoffe.

Kurz zusammengefaßt, jede Molekel eines radioaktiven Stoffes hat elementaren Charakter, solange sie noch unzerfallen existiert. In dem Augenblick, in dem sie zerfällt, verliert sie ihren elementaren Charakter und verwandelt sich in zwei neue elementare Molekel.

Weitere Beweise dafür, daß diese Stoffe Elemente sind, sind einmal darin zu finden, daß sie alle ganz bestimmte Spektrallinien aussenden. Die nachstehende Abb. 7 zeigt eine photographische Aufnahme des Hauptteils des Spektrums von Radium. Da es nicht möglich ist, Radium gänzlich rein zu erhalten, sieht man neben den

Spektrallinien des Radiums noch eine Linie des Bariums und drei des Kalziums deutlich ausgeprägt. Die Wellenlängen, die den einzelnen Linien zukommen, sind in der Abbildung angegeben, und zwar bezeichnet z. B. die Zahl 4826,1, daß diese Linie eine Wellenlänge von 0,00048261 Millimeter hat; diese Linie, so sei zur Erläuterung des Spektrums bemerkt, ist grün; das Spektrum erstreckt sich, soweit es in der Abbildung aufgenommen ist, von grün bis zum violett, in diesem liegt die leuchtend violette Linie mit der Wellenlänge 0,00038146 Millimeter. Im roten und gelben Teil des Spektrums sind keine stärkeren Linien vorhanden. Es ist das ein Spektrum, das man erhält, wenn man einen elektrischen Funken zwischen zwei Elektroden überspringen läßt, von denen die eine mit einem Radiumsalz imprägniert ist.. Man bezeichnet es als Funkenspektrum. Bringt man dagegen eine Spur eines Radiumsalzes in eine nicht leuchtende Flamme, so wird diese intensiv karminrot gefärbt, ähnlich wie eine solche Flamme (z. B. die eines Gaskochers) durch ein Natriumsalz (Kochsalz) intensiv gelb gefärbt wird oder durch ein Kaliumsalz (Pottasche) rötlich.

Auch für alle radioaktiven Stoffe können wir ein bestimmtes Atomgewicht festsetzen. Wie das im einzelnen gemacht wird, können wir hier nicht besprechen, ohne zu weit in die Chemie hineinzugeraten. Wir werden später darauf eingehen, wie z. B. das Atomgewicht von Radium bestimmt worden ist, eine Aufgabe, die ihre Schwierigkeiten in der Hauptsache darin hat, daß das Radiumsalz, das zur Messung verwandt wird, einmal nur in sehr kleinen Mengen zur Verfügung steht, von denen außerdem nichts verloren gehen darf, und dann äußerst schwer rein darzustellen ist.

Ein drittes, noch nichterwähntes Charakteristikum für ein chemisches Element sei noch in aller Kürze erwähnt. Dem russischen Chemiker Mendelejew gelang es nachzuweisen, daß alle bekannten Elemente in ihren Eigenschaften gewisse regelmäßig wiederkehrende Gleichförmigkeiten zeigten. Die Elemente ließen sich in Gruppen zusammenfassen; die Elemente jeder Gruppe waren chemisch einander ähnlich, und die Reihenfolge und die sonstigen Eigenschaften der Elemente in den verschiedenen Gruppen, z. B. die Atomgewichte, zeigten in jeder Gruppe wiederum regelmäßig wiederkehrende Eigentümlichkeiten. Das ganze wurde als periodisches System der Elemente bezeichnet. Nun waren und sind auch noch immer einige Plätze in diesen Gruppen unbesetzt, aber man konnte bereits voraussagen, daß diese Elemente zwar noch nicht bekannt waren, wohl aber gewisse Eigenschaften besitzen müssen. Diese Voraussagen sind durch die spätere Entdeckung solcher Elemente glänzend bestätigt worden. Beim Radium und den andern radioaktiven Stoffen verhielt es sich ebenso. Sie haben ihre Plätze in Lücken des periodischen Systems der Elemente erhalten können.

III. Kapitel.

Die Strahlen der radioaktiven Stoffe.

Bevor wir uns mit den radioaktiven Stoffen im einzelnen beschäftigen, müssen wir noch einige allgemeine Fragen beantworten, die für alle gleichmäßig von Wichtigkeit sind. Wir bezeichnen als radioaktive Stoffe solche, die selbständig, ohne durch äußere Einflüsse dazu veranlaßt zu sein, dauernd Strahlen aussenden.

Alle radioaktiven Stoffe senden also Strahlen aus, die im wesentlichen folgende drei Eigenschaften haben: sie schwärzen die photographische Platte, sie bringen einige Stoffe zum Leuchten, Fluoreszieren, und sie machen die Luft, die sonst als Nichtleiter für Elektrizität anzusehen ist, leitend, oder wie man es kurz ausdrückt, sie ionisieren die Luft, d. h. sie verwandeln die elektrisch neutralen Luftmolekel in positiv und negativ geladene Luftionen.

Man unterscheidet unter den Strahlen, die von den radioaktiven Stoffen ausgesandt werden, drei Arten, die wesentlich voneinander verschieden sind, und die man der Einfachheit wegen mit den Anfangsbuchstaben des griechischen Alphabets als α(Alpha)-Strahlen, β(Beta)-Strahlen und γ(Gamma)-Strahlen bezeichnet. Man kann sie in aller Einfachheit ihrem Verhalten einem Magneten gegenüber unterscheiden, wie es in der Abb. 8 ganz schematisch angedeutet ist. Stellen wir uns vor, das Radiumpräparat befinde sich in der unten gezeichneten Kapsel und sende seine Strahlen nach oben hin aus, und ein starker Magnet sei so angebracht, daß sich sein Nordpol gerade vor der Zeichnung und sein Südpol hinter ihr befindet, so werden die Strahlen sich nicht geradlinig fortpflanzen. Die α-Strahlen werden nach links abgelenkt werden, die β-Strahlen nach rechts und die γ-Strahlen werden unabgelenkt bleiben. Auch unter elektrischem Einfluß kann man derartige Ablenkungen hervorrufen, wie in der Zeichnung rechts angedeutet ist. Man stellt rechts und links zwei Metallplatten auf, von denen die rechte mit dem positiven Pol, die linke mit dem negativen Pol einer elektrischen Hochspannung verbunden ist; zwischen beiden Platten wird dann ein elektrischer Spannungszustand herrschen, den man als elektrisches Feld bezeichnet. In einem solchen elektrischen Felde wird die Ablenkung genau in gleicher Art wie durch den Magneten erfolgen; die α-Strahlen werden nach links nach dem negativen Pol zu abgelenkt, die β-Strahlen nach rechts zum positiven Pol, und die γ-Strahlen bleiben unabgelenkt,

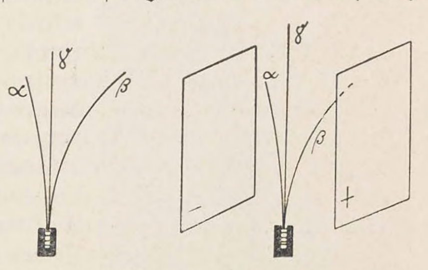


Abb. 8. Ablenkung der Strahlen radioaktiver Stoffe durch Magnet und elektrisches Feld.

Nachdem so durch derartige Ablenkungsversuche ein grundsätzlicher Unterschied zwischen den drei Strahlenarten aufgefunden ist, wollen wir dazu übergehen, ihre Eigenschaften einzeln zu besprechen; im voraus sei bemerkt, daß die gleichen Strahlenarten nicht besondere Eigentümlichkeiten der radioaktiven Stoffe sind, sondern auch bei den Gasentladungen auftreten. Man kann etwa die Kathodenstrahlen als β-Strahlen, die Röntgenstrahlen als γ-Strahlen und die Kanalstrahlen als α-Strahlen bezeichnen.

Die β-Strahlen.

Beginnen wir mit den β-Strahlen. Sie werden durch Magnete sehr leicht abgelenkt und im elektrischen Feld nach dem positiven Pol hin angezogen. Daraus folgt, daß sie im elektrischen Sinne negativer Art sein müssen. Genauere Untersuchungen ihrer Eigenschaften führten zu der Erkenntnis, daß sie aus kleinen Partikelchen bestehen, die negativ elektrisch geladen sind. Wie kann man das nun bestätigen? Wie kann man feststellen, wie groß diese Teilchen sind, wie schnell sie sich bewegen, und wie groß ihre Ladungen sind?

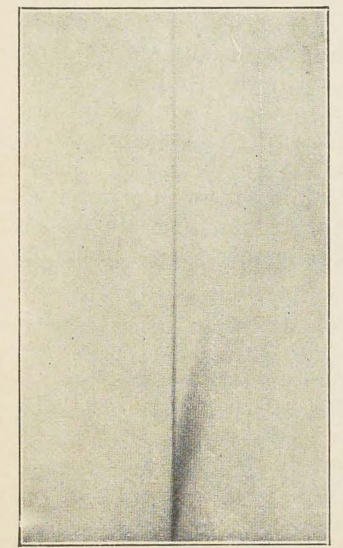


Abb. 9. Photographie der γ- und der magnetisch abgelenkten β-Strahlen.
(Nach Curie.)

Stellen wir uns vor, wir haben ein elektrisches Feld einer ganz bestimmten Stärke, und wir lassen von einem geeigneten radioaktiven Präparat ein feines Bündel β-Strahlen hindurchfallen, das wir mittels der photographischen Platte oder eines fluoreszierenden Schirmes nachweisen können. Die Abb. 9 zeigt an, wie derartige Aufnahmen aussehen. Man sieht an ihr die geradlinig fortlaufenden γ-Strahlen und die büschelförmig nach rechts abgelenkten β-Strahlen. Aus solchen Ablenkungsversuchen mittels elektrischer Felder und mittels Magneten können wir dann sofort zwei wichtige Größen berechnen. Zunächst die Geschwindigkeit der Strahlen. Wir finden dafür ganz beträchtliche Werte, die sehr nahe bis an die Lichtgeschwindigkeit heranreichen. Die Lichtgeschwindigkeit ist bekanntlich so groß, daß ein Lichtstrahl in einer Sekunde 300000 Kilometer zurücklegt. Die größten Geschwindigkeiten der β-Strahlen gehen bis zu rund 290000 Kilometern, also nahe bis zur Lichtgeschwindigkeit. Andere Präparate senden langsamere β-Strahlen aus, deren Geschwindigkeiten bis zu etwa ein Viertel jener Geschwindigkeit herabgehen. Neben der Geschwindigkeit dieser ein-

zelnen Strahlenarten können wir aber auch noch die Massen und die elektrischen Ladungen der einzelnen Teilchen bestimmen; zwar nicht beides einzeln, sondern nur das Verhältnis der Ladung zur Masse. Eine von Kaufmann aufgestellte Tabelle mag die Ergebnisse illustrieren.

Geschwindigkeit der β-Strahlen	elektrische Ladung / Masse
177 000 Kilometer in der Sekunde	16,8 Millionen
216 000 " " " "	14,9 "
237 000 " " " "	13,1 "
249 000 " " " "	11,7 "
258 000 " " " "	9,75 "
273 000 " " " "	7,7 "
282 000 " " " "	6,3 "

Ein sehr merkwürdiges Ergebnis! je größer die Geschwindigkeit der Strahlen ist, desto kleiner ist entweder ihre elektrische Ladung oder desto größer ist ihre mechanische Masse!

Betrachten wir einmal ein Beispiel! Ein Schiff, das durch das Wasser dahinfährt, wird einen Teil des ihn umgebenden Wassers mitziehen, nämlich den Teil, der infolge der Reibung an den Schiffswänden hängen bleibt, oder am Heck des Schiffes im Kielwasser strudelnd mitgezogen wird; d. h. die Masse des fahrenden Schiffes ist anscheinend größer als die des ruhenden, man könnte diese Masse seine „scheinbare Masse" bei einer bestimmten Geschwindigkeit nennen. Fährt es schneller, wird mehr Wasser mitgerissen werden, und es wächst seine scheinbare Masse.

Wie ist es nun, wenn ein elektrisch geladener Körper mit großer Geschwindigkeit bewegt wird? Jeder elektrische Strom, bei dem ja die Elektrizität mit einer Geschwindigkeit von rund 300 000 Kilometern, also der Lichtgeschwindigkeit, in Drähte fließt, erzeugt bekanntlich in seiner Nähe magnetische Kräfte, kann z. B. eine Magnetnadel ablenken, usw. So muß auch ein elektrisch geladener, sehr schnell bewegter Körper magnetische Wirkungen erzeugen, wie überdies vielfach durch Versuche, z. B. von Rowland, nachgewiesen ist; man sagt, er erzeugt um sich ein magnetisches Kraftfeld. Um dieses magnetische Kraftfeld hervorzurufen, ist natürlich eine gewisse Kraft erforderlich, oder was gleichbedeutend ist, scheinbar ist die Masse des bewegten Körpers größer geworden. Um ein solches Teilchen in Bewegung zu setzen, ist nicht nur eine Kraft erforderlich, die seiner mechanischen Masse diese Bewegung erteilt, sondern noch eine Zusatzkraft, die gewissermaßen dazu benutzt wird, um das als Folge der Bewegung entstehende magnetische Feld zu erzeugen. Also zu der „materiellen", oben als „mechanische" Masse bezeichneten kommt noch eine scheinbare elektrischen bzw. magnetischen Ursprungs. Je schneller sich ein solches Teilchen bewegt, desto kräftiger sind seine Wirkungen, die es

mittels seines magnetischen Feldes ausüben kann, auch wenn seine elektrische Ladung stets die gleiche ist, desto größer wird seine scheinbare Masse.

Auf Grund dieser Überlegung verliert die vorstehende Tabelle viel von ihrer Merkwürdigkeit. Ohne diese Einführung der scheinbaren Masse müßten wir annehmen, daß die Abhängigkeit des Verhältnisses der Ladung zur Masse von der Geschwindigkeit der Strahlen zwei Möglichkeiten zur Folge hat: entweder müssen bei den schnelleren Strahlen die elektrischen Ladungen kleiner sein, oder es müßte bei ihnen die materielle Masse größer sein. Beides erscheint nicht gerade sehr wahrscheinlich, bedarf indessen natürlich einer experimentellen Nachprüfung.

Diese ist auch erfolgt und von J. J. Thomson durchgeführt:

Es ist bekannt, daß in der atmosphärischen Luft stets eine gewisse Menge Wasserdampf vorhanden ist. Jede Luftmenge kann eine bestimmte größte Menge Wasserdampf aufnehmen, sie ist dann, sagen wir, mit Feuchtigkeit gesättigt. Diese größte Feuchtigkeitsmenge, die die Luft tragen kann, ist um so größer, je höher die Temperatur der Luft und je größer der Druck der Luft ist. Es ist ja auch weiter bekannt, wenn man einen kalten Gegenstand in eine warme, sehr feuchte Luft bringt, so wird diese in seiner nächsten Nähe abgekühlt, sie vermag nicht mehr alle in ihr enthaltene Feuchtigkeit in Gasform zu tragen, und diese schlägt sich in Form von feinen Nebeltröpfchen auf dem Gegenstand nieder. Jeder, der in die Notwendigkeit versetzt ist, ein Augenglas zu tragen, wird beim Eintreten in einen warmen Raum von der kalten Straße her schon vielfach diese Erfahrung gemacht haben, die ihm für einige Zeit die Benutzung seines Glases unmöglich macht. Entsprechend bewirkt eine plötzliche Verringerung des Luftdruckes ein Niederschlagen von Wasserdampf in Tau- oder Nebelform.

Es ist nun seit R. v. Helmholtz bekannt, daß das nur eintritt, wenn in der Luft Staubteilchen oder ähnliches vorhanden ist, an die sich die Wasserbläschen anlagern können. In ganz reiner Luft, die vollständig staubfrei ist, tritt es nicht ein. Es müssen also Kondensationskerne, wie man es nannte, vorhanden sein. Sind solche nicht vorhanden, kann die Luft mit Wasserdampf übersättigt werden, ohne daß eine Kondensation eintritt. Sodann stellte man fest, daß nicht nur Staubteilchen solche Kondensationskerne bilden können, sondern auch elektrisch geladene Luftmolekel, also Luftionen, vermutlich infolge ihrer elektrischen Anziehungskraft auf die umgebenden Wasserteilchen. Jedes einzelne Luftion ist der Mittelpunkt einer solchen Kondensation. Die elektrisch geladenen Partikelchen der β-Strahlen müssen demnach also imstande sein, unter solchen Bedingungen als Kondensationskerne zu dienen.

Diese Ergebnisse benutzte nun Thomson. Er stellte sich einen gläsernen abgeschlossenen Raum her, der mit vollständig reiner staubfreier, aber mit Wasserdampf gesättigter Luft gefüllt wurde. Dieser

Raum von mehreren Litern Inhalt war so eingerichtet, daß der Luftdruck in ihm schnell erniedrigt werden konnte. Es durfte dann also keine Kondensation eintreten. Nun sandte er β-Strahlen in diesen Raum, was ja keine Schwierigkeiten bot, da sie durch dünne Glaswände leicht hindurchgehen. Dehnte er dann die Luft aus, was ja das gleiche ist, als wenn er ihren Druck verringerte, so mußte eine Kondensation von Wasserdampf eintreten, und es mußten in diesem Raum so viele Wassertröpfchen enthalten sein, wie β-Partikelchen. Man sah dann in dem Gefäß eine feine Nebelwolke, die sich langsam zu Boden senkte.

Der weitere Weg war nun folgender: Man mußte die Gesamtanzahl der einzelnen Nebeltröpfchen bestimmen und die gesammte elektrische Ladung, die sie mitführten. Zunächst also die Bestimmung ihrer Gesamtanzahl. Das machte man so: Man hatte ursprünglich mit Feuchtigkeit gesättigte Luft und dehnte diese um einen bestimmten Betrag aus. Dann kann man aus bekannten Tabellenwerken über die Feuchtigkeitsgehalte der Luft bei verschiedenen Temperaturen und Drucken ohne weiteres entnehmen, welche Wassermenge insgesamt bei dieser Druckverminderung sich als Nebeltröpfchen kondensieren muß. Das kann also ohne jede Mühe mit Hilfe solcher in der Meteorologie viel gebrauchter Tabellen festgestellt werden; dann muß man noch die Größe der einzelnen Teilchen bestimmen. Das tat Thomson auf folgendem Wege: Bekanntlich fallen alle Körper in der freien Luft gleichmäßig schnell, ein Stein ebenso wie ein Stück Holz; anders wird es erst, wenn die Körper ganz klein werden. Dann macht sich nämlich die Reibung an der Luft stark bemerkbar. Glücklicherweise! sonst würde ein Spaziergang bei einem Regenguß mit den schwersten Gefahren für die Gesundheit verbunden sein! Durch mathematische Behandlung dieses Problems in Verbindung mit experimentellen Untersuchungen hat sich nun ergeben, daß kleine Tröpfchen, Staubteilchen usw. in Luft nicht im Laufe des Falles, wie es andere Körper tun, immer schneller fallen, sondern gleichmäßig schnell sinken, eben infolge der Reibung an der Luft, und natürlich um so langsamer, je kleiner sie sind. Das Stokessche Gesetz gibt unmittelbar die Beziehung zwischen der Größe der Teilchen und ihrer Fallgeschwindigkeit. Thomson verfuhr nun so, daß er die Fallgeschwindigkeit der Teilchen maß, indem er die Schnelligkeit bestimmte, mit der sich die Nebelwolke in seinem Beobachtungsgefäß zu Boden senkte. Daraus konnte er mit Hilfe jenes Stokesschen Gesetzes die Größe der einzelnen Teilchen berechnen, und da er ihre Gesamtmasse, wie oben gesagt, kannte, liefert eine einfache Division ihre natürlich nicht ganz kleine Anzahl.

Auf diesem nicht ganz einfachen Wege konnte er die Anzahl einer bestimmten Menge β-Partikelchen in einem abgeschlossenen Raume bestimmen. Alle diese sind negativ elektrisch geladen, wie schon oben gesagt, und sie müssen deswegen von einem positiv geladenen Körper angezogen werden. Er lud einen solchen mit einer gemessenen Elek-

trizitätsmenge, brachte ihn in jenes Gefäß herein, so daß nun alle β-Teilchen von ihm angezogen wurden und damit einen Teil seiner elektrischen Ladung neutralisierten. Die übrigbleibende Ladung wurde gemessen, und man fand so die gesamte auf jenen Partikelchen enthaltene elektrische Ladung. Da man nach dem vorher geschilderten ihre Anzahl kannte, konnte ohne weiteres die Ladung jedes einzelnen berechnet werden. Und man fand dafür $15 . 10^{-20}$ Coulomb*). Es ist das die gleiche Elektrizitätsmenge, die schon früher erwähnt ist und als ein Elektron bezeichnet wurde.

Es soll wenigstens versucht werden, eine Anschauung von jener wichtigen Zahl zu gewinnen. Eines der üblichen Klingelelemente hat zwischen seinen Klemmen eine elektrische Spannung von rund einem Volt, einer der viel zu Kleinbeleuchtung verwendeten Akkumulatoren von rund zwei Volt, und der Strom in den elektrischen Leitungen, die uns zu Beleuchtungs- und anderen Zwecken vom Elektrizitätswerk aus ins Haus geführt werden, eine Spannung von mindestens 110 Volt, vielfach auch 120 Volt oder 220 Volt. Senden wir nun den elektrischen Strom, den eine solche Spannung erzeugt, durch einen Draht, der 1, 2, 110 usw. Ohm Widerstand hat, den wir z. B. durch einen Kupferdraht von einen Quadratmillimeter Querschnitt und rund 60 Meter Länge, bzw. $2 \cdot 60 = 120$ Meter, $110 \cdot 60 = 6600$ Meter usw. darstellen können, so fließt in derartigen Drähten ein elektrischer Strom, der eine Stärke von einem Ampère hat. Es sei erwähnt, daß die Stromstärke in den älteren elektrischen Kohlenfadenlampen von 16 Kerzen Helligkeit der gebräuchlichsten Art rund ein halbes Ampère ist, in den neueren Metallfadenlampen von 25 Kerzen Helligkeit etwas mehr wie ein viertel bis ein drittel Ampère. Die von der Stromstärke ein Ampère in einer Sekunde beförderte Elektrizitätsmenge nennt man ein Coulomb. Die Messung hat nun ergeben, daß jedes Elektron aus einer — negativen — elektrischen Ladung von nur $15 . 10^{-20}$ Coulomb, wie oben erwähnt, besteht. Mit andern Worten, fließt irgendwo ein Strom von der Stärke eines Ampère durch einen Draht oder durch

*) Eine kleine Rechenvorschrift sei hier eingeschaltet. Wir haben vielfach mit sehr großen und sehr kleinen Zahlen zu tun, die mit Rücksicht auf die große Anzahl Nullen sehr unübersichtlich zu schreiben sind. Man verwendet dafür folgende Abkürzungen: $10 = 10^1$, $100 = 10^2$, $1000 = 10^3$ usw. $1000000 = 10^6$. Eine Zahl aus einer 1 und 25 Nullen würde man also als 10^{25} bezeichnen. Ebenso $\frac{1}{10} = 0{,}1 = 10^{-1}$, $\frac{1}{100} = 0{,}01 = 10^{-2}$, $\frac{1}{1000} = 0{,}001 = 10^{-3}$, $\frac{1}{1000000} = 0{,}000001 = 10^{-6}$ usw. Es gelten nur die einfachen Rechenregeln, deren Richtigkeit man leicht kontrollieren kann: $10^3 \cdot 10^7 = 10^{10}$, $10^5 \cdot 10^2 = 10^7$ usw. $10^5 \cdot 10^{-3} = 10^2$, $10^2 \cdot 10^{-1} = 10^1$ usw. $10^{-3} = \frac{1}{10^3}$, $10^{-5} = \frac{1}{10^5}$ und $\frac{1}{10^{-3}} = 10^3 . \frac{1}{10^{-5}} = 10^5$ usw. Eine Zahl wie 32500000000 kann man also abgekürzt schreiben: $325 \cdot 10^8$ oder $32{,}5 \cdot 10^9$ oder $3{,}25 \cdot 10^{10}$ usw.

ionisierte Luft, so fließt durch jeden Querschnitt dieses Drahtes oder der Luftstrecke in jeder Sekunde $\frac{1}{15 \cdot 10^{-20}} = \frac{1}{15} \cdot 10^{20} = 6 \cdot 10^{18}$ Elektronen.

Die weiteren Versuche von *Thomson* in dieser Art hatten nun das wichtige Ergebnis, daß diese so bestimmte Ladung für jedes β-Partikelchen die gleiche war, unabhängig davon, ob es sich um schnelle oder langsame Strahlen handelte; und damit kommen wir nun wieder auf den Ausgangspunkt unserer Betrachtungen zurück. Bei den *β-Strahlen* ist also die *Ladung ihrer Partikelchen*, aus denen sie bestehen, *konstant*, also muß ihre mechanische Masse sich scheinbar ändern, es muß noch eine *scheinbare Masse* vorhanden sein, wie es auch nicht anders zu erwarten ist. Man kann sogar so weit gehen, daß man sagt, und das ist die heutige Anschauung, eine materielle Masse ist bei diesen Teilchen praktisch überhaupt nicht vorhanden, es ist da nur eine scheinbare Masse, die dadurch bedingt ist, daß es sich um bewegte Elektrizitätsmengen handelt, und wenn eine ganz geringe mechanische Masse doch noch vorhanden sein sollte, ist sie derart klein, gegenüber der scheinbaren, daß wir uns um sie nicht zu kümmern brauchen.

Um also das grundlegende Ergebnis der *Thomsonschen* Versuche ganz kurz zusammenzufassen, können wir sagen: die *β-Strahlen-Partikelchen sind schnell daherfliegende Atome Elektrizität.* Es sind *Elektronen*, wie wir sie früher bezeichnet haben. Sie haben praktisch wenigstens, nichts mehr mit der materiellen Masse zu tun.

Aber nun entsteht sofort ein wichtiger Zusammenhang, der schon oben mehrfach angedeutet war, und den wir auch dazu benutzen wollen, um nachzuweisen, daß es sich wirklich um Elektronen handelt. Zu diesem Zweck wollen wir nochmals auf die *elektrolytische Zerlegung* von Lösungen zurückkommen.

Senden wir durch ein in der Abb. 1, S. 8 dargestelltes Gefäß einen elektrischen Strom, wenn dieses mit Wasser gefüllt ist, so entsteht ja auf der einen Seite Wasserstoff und auf der anderen Seite Sauerstoff, aber nur die Hälfte der Wasserstoffmenge. Weiter, verwenden wir statt Wasser Chlorwasserstoffsäure, Salzsäure, so entstehen Wasserstoff und Chlor in gleichen Mengen; senden wir den gleichen Strom hintereinander durch beide Gefäße, so entsteht in gleichen Mengen Wasserstoff und Chlor, und die halbe Menge Sauerstoff. Es wird uns das nicht weiter wundern, denn wir wissen, daß eine Wassermolekel aus zwei Atomen Wasserstoff und nur einem Atom Sauerstoff zusammengesetzt ist, eine Chlorwasserstoffmolekel aus je einem Atom Chlor und Wasserstoff. Solche und ähnliche Versuche führen zu dem Gesetz, daß bei solchen Vorgängen für jedes Atom frei werdenden Wasserstoffes ein Atom Chlor frei wird, oder für jedes frei werdende Atom Sauerstoff zwei Atome Wasserstoff oder zwei Atome Chlor usw. oder noch allgemeiner, wir haben hier den unmittelbaren Nachweis, daß *in gleichen Raumteilen Gasen die gleiche Anzahl von*

Atomen vorhanden ist. Es ist ja nun ein leichtes, messend nachzuweisen, welche Menge Elektrizität dazu erforderlich ist, um z. B. genau ein Liter Wasserstoffgas oder Chlorgas oder ein halbes Liter Sauerstoff zu erhalten. Man braucht ja nur die Anzahl der Coulombs zu ermitteln, die ausreichend sind, um diese Mengen elektrolytisch zu entwickeln.

Wenn man nun die Anzahl der Atome in einem Liter kennen würde, wäre es ein leichtes, die elektrische Ladung jedes einzelnen bei der Elektrolyse auftretenden geladenen Atoms, eines Ions, auszurechnen. Zur Lösung dieser Frage verhilft uns eine Vorstellung, die wir uns über den gasförmigen Zustand der Stoffe bilden. Jedes in ein Gefäß eingeschlossene Gas übt auf die Wände dieses Gefäßes einen Druck aus. Das Zustandekommen dieses Druckes stellen wir uns so vor, daß sich die einzelnen Atome dieses Gases in wirrer regelloser Bewegung befinden. Bald stoßen sie aneinander und werden zurückgeworfen, bald bewegen sie sich eine Strecke frei, bald stoßen sie auf die Gefäßwand und werden von ihr zurückgeworfen usw. Ungeheure Mengen von Atomen sind in jedem Gase in wilder ungeordneter Bewegung; die ständigen Stöße auf die Gefäßwand bezeichnen wir als den Druck der Gase.

Diesen ungeordneten Vorgang kann man mathematisch verfolgen und zwar, was ganz unwahrscheinlich klingen wird, nach den Gesetzen der Statistik. Genau so wie man aus Zählungen feststellen kann, daß von 1000 männlichen Neugeborenen nur 403 das 50. Lebensjahr erreichen, was eben nur bedeutet, daß von tausend ausgewählten vielleicht mehr, vielleicht auch weniger dieses Alter erreichen, im Durchschnitt aber, wenn man viele tausende in die Zählung einbezieht, immer nur 403 auf tausend im Mittel, so kann man auch aus dem Druck der Gase auf die Bewegung der einzelnen Gasatome schließen und z. B. berechnen, einen wie langen Weg jedes Atom zurücklegen wird, bis es auf ein zweites Atom stößt; selbstverständlich, wie erwähnt, nur den durchschnittlichen Weg, der tatsächlich bald länger, bald kürzer sein wird. Diese „mittlere Weglänge" der Gasatome ist z. B. bei Wasserstoff 0,000185 Millimeter, bei Sauerstoff 0,000106 Millimeter und bei Stickstoff 0,000099 Millimeter. Es sind also immerhin recht kleine Zahlen. Auch die durchschnittlichen Geschwindigkeiten der Gasatome kann man so berechnen, und man findet, daß sie sich in einer Sekunde um 1844 Meter bei Wasserstoff, um 461 Meter bei Sauerstoff und 492 Metern bei Stickstoff fortbewegen würden. Tatsächlich bewegen sie sich nie so lange in einer Richtung. Denn z. B. ein Wasserstoffatom stößt im Durchschnitt schon nach 0,000185 Millimetern auf ein anderes, wird sich also nur den 10^{-10} Bruchteil einer Sekunde gleichmäßig fortbewegen.

Man sieht also, daß man bereits mit einer recht einfachen Annahme über den Vorgang der Atombewegung in Gasen zu recht weitgehenden Kenntnissen über das Verhalten der einzelnen Atome gelangt. Nun

weiß man aber noch nichts über die Größe der Atome selbst oder ihre Anzahl in einem bestimmten Raum. Dazu verhelfen neue Beobachtungen. Wir füllen einen Cylinder oder eine Flasche mit einem Gase und schließen diese gegen die Außenluft nicht ab. Dann werden langsam einzelne Gasatome ihren Weg nach außen finden und Luftatome in das Innere der Flasche dringen. Es tritt eine „Diffusion" des Gases mit der Luft ein, und wir können experimentell feststellen, wie schnell sie bei den einzelnen Gasarten vor sich geht. Weiter können wir eine bestimmte Gasmenge zusammendrücken, so stark, bis das Gas verflüssigt ist. Dann haben wir alle Gasatome auf den denkbar kleinsten Raum zusammengepreßt, denn eine Flüssigkeit läßt sich nicht weiter zusammendrücken. Wir kennen dann den kleinsten möglichen Raum, den die Atome einer Gasmenge einnehmen können.

Aus zwei derartigen Versuchen über die Diffusion eines Gases und über seine Verflüssigung sind wir jetzt in der Lage, die wirkliche Anzahl der Atome in einem Kubikzentimeter eines beliebigen Gases zu berechnen. Man bezeichnet diese Zahl nach ihrem ersten Berechner als die Loschmidtsche Zahl, und sie wird durch eine 26 mit 18 Nullen dargestellt, kann also auch $26 \cdot 10^{18}$ geschrieben werden.

Jetzt sind wir in der Lage, die Ladung jedes einzelnen bei der Elektrolyse frei gewordenen Gasatoms feststellen zu können; und dann haben wir das entscheidende Ergebnis. Diese bei der Elektrolyse für ein Wasserstoff- bzw. das gleichwertige Chloratom usw. aufgefundene elektrische Ladung ist genau die gleiche wie wir sie bei den β-Strahlen gefunden haben. Diese Ladung von $15 \cdot 10^{-20}$ Coulomb ist das kleinste Elementarquantum, in dem Elektrizität überhaupt auftritt, es ist das Elektrizitätsatom, das Elektron, das wir hier vor uns haben. Und um diesen Abschnitt zu schließen, können wir sagen, daß die β-Strahlen, wie sie von Radiumpräparaten oder Kathodenstrahlen ausgesandt werden, nichts weiter wie fortgeschleuderte Elektronen sind, Elektrizitätsatome, die mit ungeheurer Geschwindigkeit von den Stoffen ausgestoßen werden. Die Geschwindigkeit der Strahlen reicht bis nahe an die Lichtgeschwindigkeit heran (nahezu 300000 Kilometer in der Sekunde $= 3 \cdot 10^{10}$ Zentimeter pro Sekunde).

Wir sind damit schon einen bedeutenden Schritt in die neueren Vorstellungen der Elektronentheorie hineingedrungen, trotzdem alle diese Betrachtungen, die wir hier angestellt haben, mit unserm wirklichen Thema, der Radioaktivität anscheinend recht wenig zu tun haben. Man muß aber bedenken, daß die Radioaktivität ganz besonders von grundlegender Wichtigkeit für die Elektronentheorie mit ihrer umfassenden Bedeutung für die ganze Naturwissenschaft und unsere Kenntnis von dem Aufbau der Materie ist, so daß es zum tieferen Eindringen unbedingt notwendig ist, auf alle diese hier behandelten Fragen ausführlich hinzuweisen.

Gehen wir jetzt noch etwas genauer auf die sonstigen Eigenschaften der β-Strahlen ein. Nachdem wir gefunden haben, daß es sehr

schnell fortgeschleuderte Elektronen sind, werden wir uns auch vorstellen können, daß sie sich nicht unbegrenzt weit fortbewegen werden, sondern durch materielle Stoffe an ihrer Fortbewegung gehindert werden. Die Entfernung, die sie in Luft zurücklegen, ist für diese Strahlenart wie für jede andere eine charakteristische Konstante, die man als Reichweite bezeichnet. Indessen bei den β-Strahlen, wo es sich um Strahlen der verschiedensten Geschwindigkeiten handelt, ist die Reichweite natürlich nicht allgemein angebbar. Herrn Curie ist es gelungen, solche noch in einer Entfernung von über $1\frac{1}{2}$ Metern in Luft nachzuweisen. Mehrere Millimeter Aluminium oder ein bis zwei Millimeter Blei genügen aber, um alle β-Strahlen zu absorbieren. Derartige Schichten können sie nicht mehr durchdringen. Auch z. B. durch eine mehrere Millimeter starke Paraffinschicht vermögen sie nicht durchzudringen.

Da sie weitere bemerkenswerte Eigenschaften nicht haben, wollen wir an dieser Stelle nicht ausführlicher auf sie eingehen.

Die α-Strahlen.

Wir haben oben gesagt, daß die α-Strahlen des Radiums mit den sogenannten Kanalstrahlen identisch sind. Das bedarf einer gewissen Einschränkung, und wir wollen hier zunächst auf die α-Strahlen der radioaktiven Stoffe allein eingehen.

Wie oben schon erwähnt ist, müssen die α-Strahlen elektrisch positiver Art sein, auch noch insofern anderer Art als die β-Strahlen, als sie durch Magnete und elektrische Felder sehr schwer ablenkbar sind. Im wesentlichen kann man nun genau so, wie bei den β-Strahlen feststellen, daß es sich um einzelne geladene Teilchen handelt, die mit bestimmten elektrischen Ladungen behaftet sind, und mit bestimmten Geschwindigkeiten daherfliegen. Rutherford beobachtete dieses beides und fand ihre Ladungen recht klein, — was ja auch durch die schwache elektrische Ablenkung erklärt ist. Aber weiter konnte er auch feststellen, daß diese elektrischen Ladungen nicht praktisch masselos sind, wie bei den β-Strahlen, sondern eine merkliche materielle Masse mit sich führen, an die sie unlöslich gebunden sind.

Er fand, daß es sich bei den α-Strahlen um elektrisch geladene Atome eines materiellen Stoffes handelt. Nehmen wir eine ganz bestimmte radioaktive Substanz, so sendet diese α-Strahlen, falls sie es überhaupt tut, einer ganz bestimmten Geschwindigkeit aus, die im Durchschnitt etwa ein Zwanzigstel der Lichtgeschwindigkeit beträgt, also etwa 15000 Kilometer in der Sekunde. Merkwürdig ist aber, daß die α-Strahlen, trotz dieser hohen Geschwindigkeit, andere Stoffe nur sehr schwer durchdringen können. Ihre Reichweite in Luft beträgt z. B. nur wenige Zentimeter höchstens. Ein Aluminiumblättchen von nur vier Hundertstel Millimeter Dicke ist vollständig ausreichend, sie ganz aufzuhalten.

Die Reichweite der α-Strahlen bei einer bestimmten radioaktiven Substanz ist stets die gleiche, also z. B. alle α-Strahlen, die vom Radium ausgesandt werden, haben eine Reichweite von 3,5 Zentimeter, die des Poloniums 3,77 Zentimeter usw. Sie werden also offenbar bei einem bestimmten Stoff mit einer ganz bestimmten Geschwindigkeit ausgeschleudert, und je größer ihre Reichweite ist, um so größer ist auch ihre Geschwindigkeit.

Mißt man nun ihre Ladung und ihre materielle Masse genauer, wie es Rutherford ausgeführt hat, so ergibt sich wiederum für jedes α-Teilchen eine der schon bekannten Ladungen, nämlich die Ladung eines Elektrons, nur mit dem wichtigen Unterschied, daß hier die Ladung, nicht wie beim Elektron negativ ist, sondern in gleicher Größe positiv. Überdies ist die Ladung jedes einzelnen Teilchens nicht die einfache positive Elektronenladung (wohlverstanden, es gibt keine positiven Elektronen, es ist dieser Ausdruck nur zur Kennzeichnung der Größe der Ladung gewählt), sondern die doppelte. Wenn man sich an das früher gesagte erinnert, kann man das auch so ausdrücken, daß man ein Atom vor sich hat, dem zwei Elektronen entzogen sind. Ein solches nunmehr elektrisch nicht neutrale Atom, sondern ein positives Jon mit doppelter Elementarladung, das ist jedes α-Strahlteilchen.

Die materielle Masse jedes dieser Teilchen muß ferner, wie Rutherford nachwies, ein Element mit dem Atomgewicht 4 sein. Ein solches kennt man auch, es ist das Helium, ein Gas, das auf der Sonne durch Spektraluntersuchungen aufgefunden ist, und dessen Vorkommen in größeren Mengen dann auch auf der Erde festgestellt wurde.

In Kürze haben wir also das Ergebnis, daß die α-Teilchen, wie sie von allen radioaktiven Körpern ausgeschleudert werden, positiv geladene Heliumatome sind. Je nach der Art des radioaktiven Stoffes werden sie mit mehr oder weniger großer Geschwindigkeit fortgeschleudert; diese beträgt im Mittel rund ein Zwanzigstel der Lichtgeschwindigkeit.

Es ist das ganze eine höchst merkwürdige Entdeckung! Nicht nur mit Rücksicht auf die radioaktiven Stoffe, sondern auch allgemein physikalisch! Vor zwei bis drei Jahrhunderten, zum Beginn der neueren physikalischen Wissenschaften, als Männer, deren Name in der Wissenschaft unsterblich geworden ist, ein Newton und Huygens, sich mit der Frage beschäftigten, in welcher Weise sich das Licht fortpflanzt, insbesondere wie es den leeren Weltenraum von der Sonne zur Erde durchdringt, stellte Newton die kühne Hypothese auf, daß von dem leuchtenden Körper kleine Teilchen ausgesandt werden, die mit ungeheurer Geschwindigkeit fortfliegen, und, wenn sie auf unser Auge treffen, dort den Eindruck von Licht verursachen. Das ist die Emissionstheorie des Lichtes, die der Wissenschaft damals gute Dienste geleistet hat. Aber sie führte zu einigen notwendigen Folgerungen, die mit den experimentellen Ergebnissen nicht in Einklang

zu bringen waren. Welcher Art diese waren, interessiert uns hier nicht. Die Theorie ließ sich wohl mit Hilfe einiger recht schwerfälliger Erweiterungen durchhalten, alsbald wurde sie doch verlassen, und die etwa gleichzeitig aufgestellte Wellentheorie des Lichtes angenommen, die Undulationstheorie, die Huygens begründete. Er nahm an, daß das ganze Weltall von einem feinen, unwägbaren Stoffe erfüllt ist, der auch die Räume zwischen den Atomen in allen Körpern erfüllt, dem Äther oder dem Lichtäther. Er übermittelt uns das Licht, das er in Schwingungen, in Wellenform, ähnlich wie bei den Wasserwellen, fortleitet. Ein Leuchten eines Körpers besteht darin, daß seine kleinsten Teilchen in ungeheuer schnelle kleine Schwingungen versetzt werden, die auch den umgebenden Äther zum Mitschwingen veranlassen, und trifft solch eine Schwingung unser Auge, so empfinden wir einen Lichteindruck.

Rund zweihundert Jahre hat diese Huygenssche Undulationstheorie und der durch sie eingeführte Lichtäther, wenn auch nicht in dieser, so doch in einer etwas abgeänderten Form als Grundlage für eine umfassende Lehre vom Licht gedient. Eine Unzahl der wertvollsten Entdeckungen ist durch sie gemacht worden, nicht nur optischer Art, sondern auch elektrischer; es ist durch ihre Hilfe der Nachweis gelungen, daß die optischen, elektrischen und magnetischen Erscheinungen im Wesen die gleichen sind, es gelang in wenigen mathematischen Formeln den Maxwell-Hertzschen Gleichungen, nahezu alle bekannten optisch-elektrischen Erscheinungen zusammenzufassen.

Jetzt haben wir in den α-Strahlen tatsächlich eine Lichtart — denn um Lichterscheinungen handelt es sich doch bei diesen Strahlen —, die nicht ein Schwingungsvorgang ist, sondern in einer Aussendung materieller Teilchen besteht. Hier folgt also diese Lichterscheinung tatsächlich der alten, längst endgiltig als erledigt angenommenen Emissionstheorie! Das ist das Schicksal so mancher wissenschaftlicher Theorien! Jetzt taucht die Newtonsche Theorie bei einer besonderen Lichtart wieder auf, und wir können sagen, daß wir jetzt zwei Lichtarten kennen, die eine, welche der Undulationstheorie folgt, das gewöhnliche Licht, und solches, welches der Emissionstheorie folgt, die Kanalstrahlen. Genau genommen müßten wir sogar von drei Arten sprechen. Die β-Strahlen sind doch ebenfalls Licht, das aus ausgeschleuderten Teilchen, den Elektronen besteht. Sie sind ja aber, wie wir gesehen haben, insofern von den α-Strahlen verschieden, als sie keine materielle Masse enthalten, ein indessen für die Einordnung der Lichtarten in diese beiden Theorien nicht allzu wichtiger Punkt.

Kehren wir nach dieser Abschweifung wieder zu unserm eigentlichen Thema zurück. Die α-Strahlen sind, wie wir gesagt haben, ausgeschleuderte Heliumatome. Es fehlt uns nur noch der experimentelle Nachweis, daß es sich wirklich um Helium handelt. Daß es dieses Gas sein muß, haben wir im Grunde genommen nur theoretisch aus dem Atomgewicht geschlossen.

Den Nachweis, daß es sich dabei tatsächlich um Helium handelt, haben zuerst Rutherford und Royds erbracht. Sie wählten zu ihren Versuchen ein radioaktives Gas, das wir noch genauer besprechen werden, die Emanation, und schlossen diese in ein sehr dünnwandiges Glasröhrchen ein. Dieses Röhrchen brachten sie in geeigneter Weise an einer Röhre an, die luftleer gepumpt war. Es war das eine Röhre, wie die bekannten Geißlerschen, die durch einen hochgespannten elektrischen Strom zum Leuchten gebracht werden können. Ursprünglich also, wenn dieses Rohr ganz luftleer ist, konnte kein Strom hindurchgehen und die Röhre zum Leuchten bringen, wie wir es bei den Geißlerröhren in den prachtvollen Farben sehen können.

Die Emanation sendet nun, wie man weiß, α-Strahlen aus, die die dünne Glaswand des Röhrchens, in die sie eingeschlossen war, durchdringen können. Bestehen sie also aus materieller Masse, so muß diese allmählich durch die dünne Glaswand hindurch in das große luftleer gemachte Rohr eindringen. Das geschah auch. Man merkte allmählich das Vorhandensein eines Gases in ihm, was man ja so feststellen konnte, daß nunmehr ein Strom durch die Röhre hindurchzufließen vermochte. Und weiter ist es ja nach obenstehendem bekannt, daß ein solcher Strom das in der Röhre befindliche Gas zum Leuchten bringt, und zwar in einer Farbe, die für jedes Gas charakteristisch ist, eine Farbe, die man mittels Spektralapparates genauestens untersuchen kann. Und da sah man dann mit seiner Hilfe die leuchtenden Linien, die dem längst bekannten Heliumgase zukommen. Eine zweite Methode werden wir später erwähnen.

Damit ist durch ein verhältnismäßig einfaches Experiment nachgewiesen, daß Helium unmittelbar aus den radioaktiven Stoffen entsteht, ein Element aus einem andern! Das alte alchemistische Problem ist damit mit einem Schlage zum erstenmal gelöst. Es ist ein chemisches Element in ein anderes, oder besser gesagt, da wir dazu nichts beigetragen haben, es hat sich ein Element selbständig ohne unsere Hilfe in ein anderes verwandelt.

Begnügen wir uns damit zunächst, und besprechen wir dann noch ganz kurz eine interessante Eigenschaft der α-Strahlen.

Wir haben schon früher angedeutet, daß manche Strahlenarten andere Körper zum Leuchten, Fluoreszieren anregen. So tun es bekanntlich die Röntgenstrahlen, welche den Schirm, der mit der Leuchtmasse bestrichen ist, zu dem intensiv gelbgrünlichen Leuchten bringen. Das gleiche tun auch die β-Strahlen; beide Strahlenarten vermögen nicht nur die hier meistens angewandte Leuchtmasse, Barium-Platincyanür, zum Fluoreszieren zu veranlassen, sondern auch andere Stoffe, wozu man bei radioaktiven Untersuchungen gerne ein anderes Mineral, die Sidotblende, verwendet, die man chemisch als kristallinisches Zinksulfid bezeichnen kann. Auch ein anderes Mineral, der Willemit, ein Zinksilikat, wird gerne dazu benutzt.

Setzt man also z. B. einen solchen Leuchtschirm mit Sidotblende

den β-Strahlen aus, so leuchtet er je nach ihrer Stärke mehr oder weniger hell auf; ganz gleichmäßig ohne Unterbrechungen. Auch die α-Strahlen vermögen eine ähnliche Wirkung hervorzurufen; nur in merklich anderer Art. Bei oberflächlichem Betrachten leuchtet der Schirm genau so auf, indessen, wenn man ein Mikroskop auf ihn richtet, verändert sich sein Aussehen. Man sieht dann, daß er nicht überall gleichmäßig leuchtet, sondern nur in einzelnen kleinen Stellen. Es treten nur einzelne hell leuchtende Pünktchen auf, die einen Moment aufflammen, dann sofort verlöschen, dann flammen neue auf usw., kurz es ist ein ganz unregelmäßiges Aufleuchten feinster Pünktchen in wildem Durcheinander. Crookes hat, um dieses Aufleuchten und Verschwinden der Pünktchen, das man nach einem in der Astronomie für das Funkeln der Sterne gebräuchlichen Ausdruck als Szintillieren bezeichnet, ein kleines Instrument konstruiert, das er Spinthariskop benannte. Es besteht einfach aus einem kleinen Leuchtschirm, vor dem an einer Spitze ein Körnchen einer radioaktiven Substanz angebracht ist. Diese sendet die α-Strahlen ständig aus und bringt den Leuchtschirm zum Szintillieren. Darüber befindet sich eine starke Lupe, die dieses unmittelbar in geeigneter Vergrößerung zu beobachten gestattet. Den Anblick, den man so hat, gibt schematisch die Abb. 10 wieder, die darstellt, wie die einzelnen Lichtpünktchen aufleuchten.

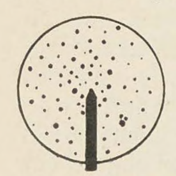


Abb. 10.
Spinthariskop.

Was hat das aber nun zu bedeuten? Das erklärt sich einfach so, daß jedem einzelnen α-Strahl ein solcher Lichtblitz entspricht; mit andern Worten, da jeder α-Strahl nichts weiter als ein fortgeschleudertes Heliumatom ist, so können wir uns vorstellen, daß es auf seiner Bahn auf den Schirm auftrifft, und infolge seiner Energie, wegen der ungeheuren Geschwindigkeit, mit der es aufprallt, dort ein Leuchten verursacht. Man mache sich nun einmal dieses Ergebnis genauer klar. Was hat man denn damit erreicht? Zum erstenmal ist es da möglich gewesen, die Tätigkeit der einzelnen Atome zu sehen! Jedes fortgeschleuderte Atom, das auf den Leuchtschirm auftrifft, sehen wir in der Wirkung, die es auslöst. Sonst hat es immer geheißen, die Atome sind für uns unsichtbar; jetzt können wir sagen, daß wir die einzelnen Atome selbst wohl immer noch nicht sehen können, aber die Wirkungen der einzelnen Atome werden uns unmittelbar zum Bewußtsein geführt.

Durch geeignete Anordnung läßt es sich ohne Mühe so einrichten, daß das Szintillieren nicht ganz unregelmäßig, sondern etwas übersichtlicher eintritt, nicht in unzählbarer Art, sondern seltener, so daß in der Minute vielleicht nur mehrere Dutzend α-Teilchen auf den Leuchtschirm auftreffen. Dann ist man in der Lage, die von einer radioaktiven Substanz ausgehenden Teilchen unmittelbar zu zählen, und es gibt da eine größere Anzahl Zählmethoden, um die Anzahl der von einer bestimmten Menge eines radioaktiven Stoffes weggeschleuderten Heliumatome rein zahlenmäßig festzulegen, eine sehr viel

einfachere Methode wie die früher erwähnte Thomsonsche der Elektronenzählung. Wir werden auf sie noch genauer eingehen und ihre Verwendung besprechen.

Die γ-Strahlen.

Die dritte Art der von radioaktiven Körpern ausgehenden Strahlen sind die sogenannten γ-Strahlen, von denen wir mit Sicherheit noch nicht sehr viel wissen. Sie führen keine elektrischen Ladungen mit sich, da es nicht gelungen ist, sie durch die stärksten Magnete aus ihrer geradlinigen Bahn abzulenken. Genau so wie die Röntgenstrahlen, im allgemeinen aber noch stärker wie diese, durchdringen sie sonst undurchsichtige Gegenstände, so daß man diese γ-Strahlen ebenfalls zum Herstellen von Röntgenbildern benutzen kann. Zwei solche Bilder, die mittels γ-Strahlen hergestellt sind, geben die Abb. 11 und Abb. 12.

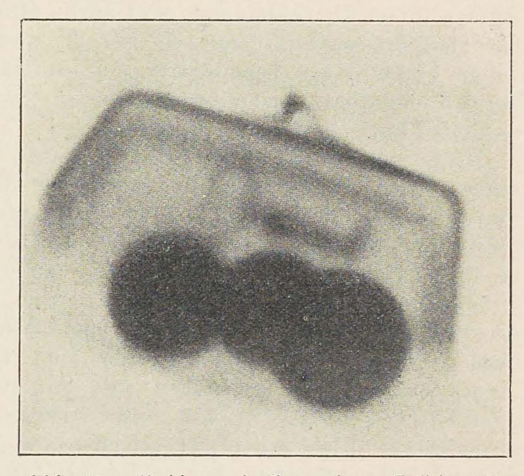


Abb. 11. Radiumaufnahme eines Geldbeutels. (Nach Curie.)

Man unterscheidet bei den Röntgenstrahlen harte und weiche Strahlen, die man durch geeignete Ausführung der Röntgenröhre herstellen kann. Die weichen Strahlen sind wenig durchdringende, die durch Knochen und dicke Körperteile, wie den menschlichen Brustkasten, nicht hindurchgelangen. Macht man also z. B. von der menschlichen Hand eine Röntgenaufnahme mit weichen Strahlen, so werden die Handknochen einen kräftigen Schatten werfen, und das Bild der Hand wird klar, kontrastreich und deutlich werden. Anders ist es mit den harten Strahlen. Sie durchdringen auch leicht den ganzen menschlichen Körper, und bei jenen Handauf-

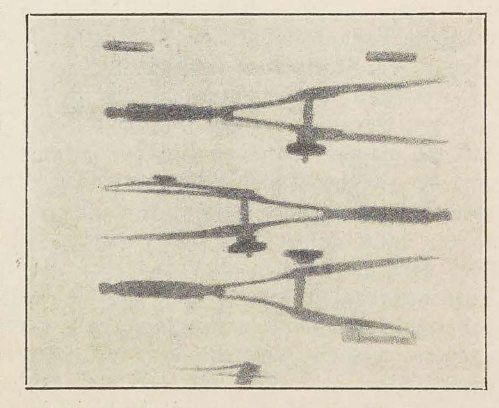


Abb. 12. Radiumaufnahme eines Reißzeuges. (Nach Soddy.)

nahmen werden die dünnen Handknochen ebenfalls durchstrahlt werden, und man wird ein Bild erhalten, das verschwommen und ohne Kraft ist und keine Einzelheiten zeigt. Der praktische Röntgenarzt wird sich also vor jeder Aufnahme über den Charakter der Strahlen, die seine Röntgenröhren geben, informieren müssen, was ohne Mühe möglich ist, um dann für jede Aufnahme die geeignetste auszusuchen.

Die γ-Strahlen der radioaktiven Stoffe, die wir in allen ihren Eigenschaften den Röntgenstrahlen gleichsetzen können, sind im allgemeinen ihrem Charakter nach ganz harte, also sehr durchdringende Strahlen, bei denen es sogar gelungen ist, durch den menschlichen Brustkasten hindurch den Leuchtschirm zum Aufleuchten zu bringen. Auch durch Bleiplatten von mehreren Zentimetern Dicke gehen sie noch, natürlich stark geschwächt, hindurch.

Nun noch wenige Worte über die Natur der γ-Strahlen. Bis vor kurzem hat man nichts sicheres über ihre Art gewußt. Man nahm nur an, daß sie höchst wahrscheinlich keine solchen waren, wie die α- und β-Strahlen, die aus ausgeschleuderten Teilchen bestehen, sondern daß sie ihren Träger im Lichtäther haben, daß sie, ähnlich wie die Lichtwellen, Erschütterungen des Äthers sind, die sich angenähert wie jene fortpflanzen, auch mit der gleichen Geschwindigkeit. Wie lang diese Wellen waren, wußte man auch nicht, trotzdem doch die Wellenlänge der einzelnen Lichtwellen eine der am genauesten bekannten physikalischen Größen ist, auch wenn mehrere Tausend auf ein Millimeter gehen. Wohl erst in den beiden letzten Jahren hat sich die Überzeugung Bahn gebrochen, daß es sich bei den Röntgenstrahlen sowohl wie bei den γ-Strahlen wirklich um Ätherwellen handelt, die mit denen des Lichtes vollständig wesensgleich sind. Sie unterscheiden sich nur insofern von den Lichtwellen, als ihre Wellenlängen viel kürzer sind. Man hat Grund zu der Annahme, daß die Wellenlänge dieser Strahlen etwa von der Größenordnung $1 \cdot 10^{-9}$ Millimeter ist, daß also etwa tausend Millionen Wellen auf ein Millimeter kommen, während vom gewöhnlichen Licht, etwa dem gelben, etwa dreitausend Wellen ein Millimeter ausmachen.

Hier hat die Forschung noch viel zu arbeiten. Man weiß nur sicher, daß der Vorgang bei der Entstehung der Röntgenstrahlen derart ist, daß sie niemals von der Kathode unmittelbar sofort ausgehen. Die von der Kathode fortgeschleuderten Elektronen müssen erst auf ein materielles Hinternis treffen, also z. B. auf die Glaswand der Röntgenröhre, dann gehen von dieser Stelle erst die Röntgenstrahlen aus. (Bei dem praktischen Gebrauch der Röntgenstrahlen läßt man die Kathodenstrahlen nicht direkt auf die Glaswand auftreffen, da diese dabei zu heiß würde und geschmolzen werden könnte. Die Kathodenstrahlen werden vielmehr auf die „Antikathode“, einen geeigneten Metallschirm geworfen, und von hier gehen dann die Röntgenstrahlen aus. Die Antikathode ist mit Kühleinrichtungen versehen.) Das Aufprallen der Elektronen auf ein solches Hindernis gibt eine Erschütterung

im Lichtäther, infolge der plötzlichen Änderung des mitgeführten magnetischen Feldes, und diese Äthererschütterung pflanzt sich als Wellenbewegung fort.

Bei den radioaktiven Stoffen stellt man sich entsprechend vor, daß die ausgeschleuderten β-Teilchen auf die umliegenden Atome auftreffen, und so γ-Strahlen verursachen. Es kommen nämlich stets nur dann γ-Strahlen bei radioaktiven Stoffen vor, wenn auch β-Strahlen vorhanden sind. Wir kennen radioaktive Stoffe, die α-Strahlen allein, oder β-Strahlen allein, oder α- und β-Strahlen zugleich aussenden, oder auch alle drei Strahlenarten, aber keinen Stoff, der nur γ-Strahlen aussendet; tut er dieses, so sind auch stets β-Strahlen vorhanden.

Man sieht, unser Wissen über die γ-Strahlen ist noch sehr lückenhaft, und es wird noch einer rastlosen Forschertätigkeit bedürfen, um ihre Natur ganz klarzustellen.

IV. Kapitel.

Die radioaktiven Stoffe und ihre Umwandlungen.

Gehen wir jetzt dazu über, die verschiedenen bekannten radioaktiven Stoffe einzeln zu besprechen. Das soll neben der Beschreibung ihrer Eigenschaften aber gleichzeitig so erfolgen, daß wir darstellen, *wie sie systematisch ineinander übergehen*, wie der eine aus dem andern entsteht usw. Wir tun dieses auf Grund der im Jahre 1903 von *Rutherford* und *Soddy* aufgestellten *Zerfallstheorie*, von der wir schon oben ein Beispiel gehabt haben, als wir davon sprachen, daß sich Radium in Helium und Emanation zerspaltet.

Zunächst noch einige Vorbemerkungen. Wenn ein radioaktiver Körper zerfällt oder sich ändert, so kann er einmal *materielle Massen ausstrahlen*, d. h. also, er sendet α-Strahlen in Form von weggeschleuderten Heliumatomen aus. Jedes Atom spaltet sich demnach so, daß es ein Heliumatom abgibt. Da Helium das Atomgewicht 4 hat, d. h., ein Heliumatom viermal so schwer wie ein Wasserstoffatom ist (vgl. S. 8), muß sich also das Atomgewicht des neuen Stoffes von dem des alten um 4 Einheiten unterscheiden.

Andere Stoffe zerfallen so, daß sie *Strahlen nicht materieller Art aussenden*, also β-Strahlen, oder β- und γ-Strahlen. Bei einem solchen Zerfall kann sich also das Atomgewicht nicht merklich ändern. Aber da die neuen Stoffe doch nun andere materielle Eigenschaften haben, so muß sich doch in ihren Atomen etwas geändert haben. Wir müssen da annehmen, da jedes Atom doch wenigstens ein Elektron abgegeben haben muß, daß die Art und Weise, wie die einzelnen

materiellen Teilchen eines Atoms in Verbindung mit den vorhandenen Elektronen sich gruppieren, anders geworden ist. Von jener Anschauung müssen wir uns frei machen, daß die Atome ganz einfache Gebilde sind. Im Gegenteil, nach unseren Erfahrungen müssen sie recht kompliziert aufgebaut sein. Daß eine solche Annahme, wie die obige, nichts auffallendes ist, lehrt am besten das Beispiel der Chemie, wo wir große Mengen von Verbindungen kennen, die genau den gleichen Prozentgehalt an Sauerstoff, Wasserstoff, Stickstoff und Kohlenstoff bei gleichen Atomzahlen enthalten, in allen ihren Eigenschaften aber ganz verschieden sind. Auch da nehmen wir an, daß nur die Anordnung der Atome in jeder einzelnen Molekel verschieden ist.

Ein wesentliches Charakteristikum aller radioaktiven Stoffe ist ihre *Zerfallsgeschwindigkeit*. Nehmen wir als Beispiel ein Gramm irgendeiner radioaktiven Substanz. Diese zerfällt dann so, daß in einer bestimmten Zeit die Hälfte aller Atome zerfallen ist, von den übrigbleibenden zerfällt wiederum die Hälfte in genau der gleichen Zeit, von den übrig gebliebenen wieder die Hälfte in der gleichen Zeit, es bleiben also in gleichen Zeitabschnitten unzerfallen übrig 1 Gramm (zu Beginn), $1/2$ Gramm, $1/4$ Gramm, $1/8$ Gramm usw. Bis die Gesamtmenge zerfallen ist, wird es also theoretisch unendlich lange dauern. Praktisch wird natürlich in bestimmter endlicher Zeit die ganze Menge als zerfallen anzusehen sein. Um nun zahlenmäßig die Zerfallsgeschwindigkeit angeben zu können, mißt man die Zeit, bis gerade die Hälfte der Substanz zerfallen ist, und bezeichnet sie als „*Halbwertszeit**). Wenn wir also sagen, daß die Radiumemanation eine Halbwertszeit von 3,8 (genauer 3,85) Tagen hat, so besagt das, daß eine vorhandene Emanation stets so zerfällt, daß nach 3,8 Tagen nur noch die Hälfte von ihr vorhanden ist. Wenn also z. B. die *Brambacher-Sprudel-Gesellschaft* in Bad Brambach ihr sehr stark emanationshaltiges Quellwasser auf Flaschen füllt und auf die Flasche stets Tag und Stunde der Füllung aufdruckt, so ist das wohl verständlich. Denn der Patient, dem eine solche Flasche zugesandt wird, kann dann, wenn er das Quellwasser trinkt, gut feststellen, wie groß noch der Emanationsgehalt des Wassers ist. Er weiß dann, daß nach

3,8	Tagen	nur	noch	50	Proz.	der	anfänglichen	Emanation	vorhanden ist.
7,6	"	"	"	25	"	"	"	"	" "
11,4	"	"	"	12,5	"	"	"	"	" "
15,2	"	"	"	6,25	"	"	"	"	" "
19,0	"	"	"	3,125	"	"	"	"	" "
22,8	"	"	"	1,56	"	"	"	"	" "
26,6	"	"	"	0,78	"	"	"	"	" "

*) Vielfach findet man statt der Halbwertszeit die „*Lebensdauer*" radioaktiver Stoffe angegeben. Aus mathematischen Gründen ist die Lebensdauer das 1,443fache der Halbwertszeit. Sie ist nicht die Zeit, in der alle vorhandene Substanz zerfallen ist.

Ein längeres Aufbewahren der Flaschen dürfte also nicht zweckmäßig sein.

Es dürfte auch nicht überflüssig sein, daran zu erinnern, daß wir schon früher auf die vollständige Unabhängigkeit des Zerfalles radioaktiver Stoffe von äußeren Einwirkungen hingewiesen haben; mit anderen Worten, die Halbwertszeit charakterisiert jeden derartigen Stoff vollständig; und wenn wir einen radioaktiven Stoff vor uns haben, von dem wir noch nicht wissen, welcher Art er ist, so können wir durch Messung seiner Halbwertszeit — die selbstverständlich auch in kürzerer Zeit als diese tatsächlich ist, ausgeführt werden kann — feststellen, ob es einer der bekannten ist.

Alle bisher erforschten radioaktiven Stoffe lassen sich in drei Zerfallsreihen eingliedern, in die des Urans, des Thoriums und des Aktiniums. Wir wollen diese jetzt der Reihe nach besprechen.

Die Zerfallsreihe des Urans.

Das Uran ist ein sehr lange bekanntes Element, dessen radioaktiver Charakter bis kurz vor der Entdeckung des Radiums unbekannt war. Sein Atomgewicht ist 238,5. Das wichtigste Mineral, in dem es enthalten ist, ist die schon erwähnte Pechblende, aus der durch ein kompliziertes chemisches Verfahren, das bereits früher angedeutet ist, das Radium gewonnen wird.

Bei der chemischen Analyse der verschiedensten Uranerze, von denen wir eine ganze Menge kennen, hat sich herausgestellt, daß in ihnen allen das Verhältnis des darin enthaltenen Radiums, das in ihnen stets vorhanden ist, zum Uran das gleiche ist, und zwar findet man angenähert in 3000000 Teilen Uran einen Teil Radium. Das war der Anlaß, daß man zu der Vermutung kam, Uran könnte die Muttersubstanz des Radiums sein, aus der durch Zerfall dann Radium entsteht. Im Laufe der Millionen Jahre zerfällt Uran allmählich in das langlebige Radium, und dieses zerfällt weiter, bis sich endlich ein gewisser Gleichgewichtszustand mit solchen Mengenverhältnissen an Uran und Radium herausbildet, indem ebensoviel Radium entsteht, wie zerfällt; das ist dann der heutige Zustand.

Die Halbwertszeit von Uran ist etwa 5000 Millionen oder $5 . 10^9$ Jahre, also eine ungeheuer lange Zeit. Es sendet, falls es keine anderen strahlenden Beimischungen enthält, nur α-Strahlen aus, deren Reichweite etwa 2,5 Zentimeter beträgt. Richtiger sind die Uranstrahlen als doppelte α-Strahlen zu bezeichnen oder, was wahrscheinlicher ist, Uran besteht aus zwei verschiedenen Stoffen, die beide α-Strahlen normaler Art aussenden, einem Uran 1 und einem Uran 2, mit einer Million Jahren Halbwertszeit und 2,9 Zentimeter Reichweite.

Das Radium ist nicht das unmittelbare Zerfallsprodukt des Urans, sondern nach dem Ergebnis einer Anzahl Versuche verschiedenster Forscher wie Crookes, Becquerel, Soddy, Antonoff, Marck-

wald u. a. entstehen zunächst noch eine Reihe Zwischenprodukte. So zunächst eine in ihren Eigenschaften fast ganz unbekannte Substanz, das Radiouran, von dem wir noch fast gar nichts wissen, und aus diesem das Uran X, ein Element mit einem Atomgewicht von etwa 230, das β- und γ-Strahlen aussendet und eine Halbwertszeit von 24,6 Tagen nur hat. Neben dem Uran X gibt es anscheinend noch einen andern Körper, Uran Y, der ganz kurzlebig ist, anscheinend mit nur 1,5 Tagen Halbwertszeit, dessen Stellung in der Zerfallsreihe noch nicht ganz sicher ist; und hieran schließt sich dann ein besser bekannter radioaktiver Körper, das Ionium. Es ist Boltwood gelungen, ihn, da er sich chemisch von den übrigen unterscheidet, gesondert darzustellen. Außerdem gelang es Hahn nachzuweisen, daß er auch in den radioaktiven Thoriummineralien vorkommt. Hier scheinen diese beiden Reihen zusammenzuhängen, da Ionium seinem chemischen Verhalten nach zur Thoriumreihe gehört.

Ionium sendet α-Strahlen von 3,0 Zentimeter Reichweite aus und hat ein Atomgewicht von etwa 230. Seine Halbwertszeit ist angenähert 200000 Jahre, kann indessen, da sie noch zu unsicher bekannt ist, auch merklich anders sein.

Unmittelbar an das Ionium schließt sich dann der berühmteste radioaktive Stoff, das Radium. Sein Atomgewicht muß, da es durch Abspaltung eines Heliumatoms aus dem Ionium entsteht, etwa 226 sein. Unmittelbare Bestimmungen durch Hönigschmidt, Gray und Ramsay gaben 225,95. Wir werden darauf noch genauer eingehen. Seine Halbwertszeit hat den ziemlich hohen Wert von 1800 Jahren. Es sendet α-Strahlen von 3,3 Zentimeter Reichweite und β-Strahlen aus.

Chemisch gehört das Radium zur Gruppe der Erdalkalimetalle, zusammen mit den anderen Elementen, Kalzium, Strontium und Barium. Wie auch schon früher erwähnt ist, steht es dem Barium besonders nahe, so daß seine chemische Trennung von ihm äußerste Mühe verursacht.

Die praktische Darstellung erfolgt aus der Pechblende und in geringem Umfange aus einigen Quellwässern, die Radium gelöst enthalten, wie z. B. einige Quellen in Bad Kreuznach an der Nahe. Soweit dem Verfasser bekannt ist, sind bis heute überhaupt erst rund 15 Gramm Radium dargestellt. Zur Zeit dieser Niederschrift soll es im Handel nicht zu haben sein. Zu berücksichtigen ist dabei allerdings, daß hierbei nicht nur die technischen Fragen der Herstellung eine Rolle spielen, sondern finanzielle Fragen. Heute ist das Radium Spekulationsobjekt, natürlich nicht zum Vorteil für ernsthafte Forscher und zur Beförderung seiner Anwendung in der Medizin.

Das Spektrum, sowohl das Funkenspektrum, wie das Flammenspektrum, ist bereits auf Seite 19 beschrieben und teilweise abgebildet worden.

Bis vor kurzem war das Radium isoliert nicht bekannt, sondern

nur als chemische Verbindung, bis es Frau Curie und Debierne gelang, rein metallisches Radium durch einen elektrolytischen Vorgang darzustellen. Abgesehen von dem theoretischen Interesse, das es hat, das reine Element darzustellen, kommt dieser Entdeckung eine weitergehende praktische Wichtigkeit nicht zu; denn die Strahlungseigenschaften des Radiums sind in den Radiumverbindungen in genau der gleichen Weise vorhanden wie an dem reinen Element selbst. Überdies ist es an der Luft sehr wenig beständig und geht, vermutlich mit dem Stickstoff der Luft, wieder eine chemische Verbindung ein.

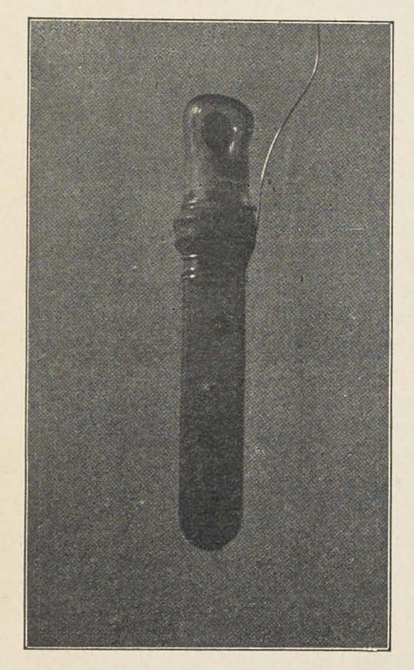


Abb. 13. Röhre mit Radiumchlorid. (Nach Lecher.)

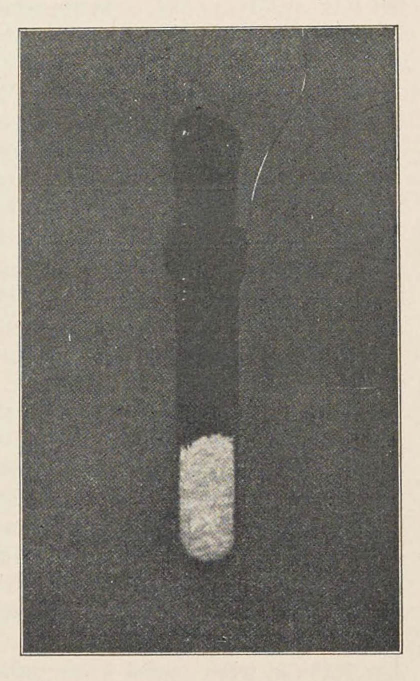


Abb. 14. Röhre mit Radiumchlorid (Abb. 13), im eig. Licht aufgenommen. (Nach Lecher.)

Sofort nach der ersten Darstellung größerer Radiumpräparate fielen zwei ganz merkwürdige Eigenschaften dieser auf. Die Leuchterscheinungen und die Wärmeentwicklung.

Die beiden Abbildungen 13 und 14 zeigen zwei Photographien eines Röhrchens mit einem Gramm Radiumchlorid aus dem Besitze des Wiener radiologischen Institutes, etwa in natürlicher Größe. Die erste Aufnahme ist eine der gewöhnlichen und bietet nichts bemerkenswertes. Dagegen ist die andere in einem dunklen unbeleuchteten Zimmer gemacht, mittels des eigenen Lichtes des in dem

Röhrchen befindlichen Radiums. Die Leuchtkraft dieses Präparates ist ausreichend, es selbst zu einem wenn auch schwachen Leuchten zu bringen, und auch die nächste Umgebung so weit zu erhellen, wie erforderlich ist, um auf den photographischen Platten ausreichende Spuren zu hinterlassen. Eine derartige Erscheinung ist bisher bei keinem Stoffe bekannt. Alle, die man sonst in eigenem Lichte leuchtend gesehen hat, wie bereits früher erwähnt, phosphoreszieren, d. h. sie müssen vorher mit fremdem Licht bestrahlt sein, und sie verschlucken dieses gewissermaßen, um es später wieder von sich auszustrahlen, oder sie fluoreszieren, d. h. sie werden von beliebigem Licht getroffen, das auch für unsere Augen unsichtbar sein kann, und senden unter dessen Einwirkung ihr eigenes Licht aus. Ein Beispiel für das erste sind die mancherlei Leuchtfarben, wie sie z. B. für den Anstrich von Zifferblättern von Uhren verwendet werden, und manche faulenden Holzarten, und für das zweite der Fluoreszenzschirm der Röntgenapparate, der mit Bariumplatincyanür oder Zinksulfid bestrichen ist und fluoresziert, wenn er in die Nähe einer arbeitenden Röntgenröhre gebracht wird, auch wenn diese vollständig von einem lichtdicht schließenden Holzkasten umgeben ist.

Insofern steht das Radium eigenartig da. Es sei noch bemerkt, daß die früher bildlich dargestellte Eigenschaft der Pechblende (Abb. 4) zu leuchten, natürlich auf nichts anderem als ihrem Radiumgehalt beruht.

Wie schon früher bei der Besprechung der einzelnen Strahlenarten gesagt ist, vermag das Radium andere Stoffe zum intensiven Fluoreszieren anzuregen. Zu diesen gehört neben den schon früher erwähnten noch ein bekannter Stoff, der Diamant; und was für Liebhaber echter Steine recht wertvoll ist, nur der echte Diamant, und nicht die aus Glasflüssen teilweise täuschend ähnlich hergestellten falschen. Man hat also im Radium ein immerhin recht einfaches Mittel, echte und falsche Diamanten mit Sicherheit zu unterscheiden.

Radium selbst sendet keine γ-Strahlen aus, wohl aber die stets bei ihm entstehenden Zerfallsprodukte. Daher kann man es zur Herstellung von „Röntgenbildern" benutzen, wie selbstverständlich ist, und es bedarf das keines Hinweises (Abb. 11 und 12).

Noch auffallender vielleicht als die Lichterscheinungen beim Radium sind seine Wärmewirkungen. Jedes Radiumpräparat erzeugt unaufhörlich Wärme in durchaus nicht unmerklicher Menge. Nach den Messungen von Curie und Laborde entwickelt ein Gramm Radium in jeder Stunde 118 Wärmeeinheiten, d. h. soviel Wärme, wie nötig ist, um die Temperatur von 118 Kubikzentimeter oder etwas mehr wie einem Zehntel Liter Wasser um einen Grad zu erhöhen. Diese Wärmeentwicklung geht unaufhörlich vor sich, anscheinend ohne abzunehmen. Natürlich nicht unendlich lange, denn es braucht wohl nicht betont zu werden, daß sie sich genau so verändert, wie die Aktivität

allmählich schwächer wird, worüber wir oben gesprochen haben. Interessant ist es noch, zu erwähnen, daß auch bei den tiefsten Temperaturen die Wärmeentwicklung genau so vor sich geht, wie bei den höchsten, ein Umstand, der natürlich eng damit zusammenhängt, daß auch der Zerfall radioaktiver Stoffe von der Temperatur, bei welcher er vor sich geht, unabhängig ist.

Wir kennen eine ungeheure Menge von chemischen Reaktionen, die starke Wärmeentwicklung zur Folge haben, alle die z. B., die mit Verbrennungserscheinungen verlaufen, die Explosionsvorgänge usw. Alle dabei auftretenden Wärmemengen sind kleiner als die von Radium im Laufe der Jahre erzeugte Wärmemenge. Alle diese treten gar nicht mehr oder nur in ganz geringfügigem Maße ein, wenn wir die betreffenden Körper auf die niedrigsten uns zu Gebote stehenden Temperaturen abkühlen. Beim Radium ist das nicht der Fall.

Wie kommt nun diese Leucht- und Wärmewirkung zustande? Wir wissen, daß das Radium allmählich zerfällt, und zwar werden α-Strahlen, d. h. Heliumatome, nach genau bekannten Gesetzen gleichmäßig abgespalten. Diese Heliumatome treffen auf die in der Nähe befindlichen Radiumatome und regen diese einmal zum Leuchten an und erwärmen sie auch. Das ist bei der großen Geschwindigkeit der ausgeschleuderten Atome nichts auffallendes. Wenn ihre materielle Masse auch winzig klein ist — es ist ja nur die Masse eines Heliumatoms —, so wird das doch wieder aufgehoben durch ihre ungeheure, alle sonst bekannten weit zurücklassende Geschwindigkeit. Überdies lehrt die Mathematik und Mechanik, daß von zwei gleich schweren Körpern, von denen der eine mit doppelt so großer Geschwindigkeit wie der andere fortgeschleudert wird, dieser beim Aufprallen nicht nur die doppelte Stoßkraft, sondern die vierfache entwickelt. Jene so durch den Anprall der Atome aneinander entwickelten Energiemengen sind vollständig ausreichend, die dauernde Wärmeentwicklung des Radiums zu erklären. Diese Wärmeentwicklung wird natürlich nicht zur Folge haben, daß das Radium immer heißer und heißer wird, die Wärme wird vielmehr zum größten Teil an die Umgebung abgegeben. Jedenfalls aber haben stärkere Radiumpräparate stets eine mehrere Grade höhere Temperatur als ihre Umgebung, was ohne Mühe experimentell nachweisbar ist.

Aus der Lebensdauer des Radiums und seiner Wärmeentwicklung können wir leicht berechnen, wieviel Wärme ein Gramm Radium während seiner ganzen Lebensdauer abgibt. Wir kommen da zu einer recht hohen Zahl, nämlich $2{,}9 \cdot 10^9$ Wärmeeinheiten; zur Erzeugung einer solchen Wärmemenge nach den üblichen chemischen Verfahren müßten wir etwa 350 Kilogramm Kohle verbrennen. Solche Energiemengen werden beim Zerfall nur eines Grammes Radium, also etwa eines Fingerhutes voll, frei!

Neben jenen beiden Wirkungen kommen Radiumpräparaten noch

eine ganze Menge anderer zu. So machen sie die Luft elektrisch leitend. Durch den Anprall der ausgesandten Strahlen werden die elektrisch neutralen Luftmolekel von einzelnen Elektronen befreit oder erhalten einzelne dazu, die Luft wird also ionisiert, und der Erfolg ist der, daß ein elektrischer Strom jetzt die Luft passieren kann, während vorher die Luft für ihn nicht leitend war. Man kann das experimentell so nachweisen, daß man ein Elektroskop ladet, eines der gewöhnlichen Blättchenelektroskope (vgl. Abb. 24 weiter unten). Es spreizen sich dann die beiden Blättchen auseinander und bleiben es auch bei gewöhnlicher Luft. Bringt man aber ein Radiumpräparat in die Nähe, so macht dieses die Luft leitend, und die im Elektroskop enthaltene Elektrizität kann ausströmen und die Blättchen fallen zusammen.

Auch andere interessante elektrische Wirkungen hat Radium, indem es bei Bestrahlung feste und flüssige Stoffe, die sonst elektrische Nichtleiter sind, Schwefel, Paraffin, Benzol, Schwefelkohlenstoff usw. zu elektrischen Leitern macht.

Gehen wir zum Schluß noch kurz auf die chemischen Vorgänge ein, die Radium veranlaßt. Zunächst wird Wasser, wie auch durch den elektrischen Strom, durch Radium in seine Bestandteile zerlegt, in Wasserstoff und Sauerstoff. Ein Gramm Radium vermag, wie Versuche von Curie, Debierne und Ramsay gelehrt haben, in einer Stunde etwa ein halbes Kubikzentimeter dieser Gase zu erzeugen. Ähnlich wird Sauerstoff umgewandelt, zwar nicht in einen anderen Körper, sondern nur in eine andere Modifikation, das Ozon. Weiter wird Ammoniak in Stickstoff und Wasserstoff zerlegt usw.

Merklich anderer Art sind verschiedene Färbungserscheinungen durch Radium. Die Glasröhrchen, in denen Radiumpräparate aufbewahrt werden, werden unter ihren Einflüssen gefärbt, braun, violett, gelb, je nach der Art des Glases. Wie diese Färbung zustande kommt, ist noch nicht festgestellt. Auch viele Salze erleiden solche Färbungen. Steinsalz färbt sich gelb, geschmolzener Borax blau. Ein Teil solcher Salze behält diese Farbe bei, andere, wie Bromkali, das blau gefärbt wird, verlieren sie mehr oder weniger schnell.

Praktisch sind solche Versuche gelegentlich unternommen, um wenig wertvolle Edelsteine zu verbessern. Sie wurden mit starken Radiumpräparaten zusammen eingeschlossen und veränderten unter deren Einflüssen teilweise ihre Farbe, so daß sie nachher zu wesentlich höheren Preisen verkauft werden konnten.

Auf die sehr wichtigen physiologischen Wirkungen der Radiumstoffe wollen wir an dieser Stelle nicht eingehen, sondern diese im Zusammenhang an anderer Stelle behandeln.

Alle Radiumpräparate zerfallen, wie bereits erwähnt ist, unter Abspaltung von Helium in Form von α-Strahlen. In allen Uranmineralien finden wir also Helium. Und neben Helium ein anderes

eigenartiges Gas, die Emanation. Die Emanation ist die Tochtersubstanz des Radiums, die aus ihm durch Atomzerfall unter Abspaltung eines Heliumatoms entsteht. Sie muß also, wie auch durch Versuche festgestellt ist, ein Atomgewicht von etwa 226 — 4 = 222 haben.

Es verdient immerhin Beachtung, daß ein fester Körper beim Zerfall sich in ein Gas verwandelt. Die Emanation hat vollständig die Eigenschaften anderer Gase, z. B. Helium, Argon usw., die man als Edelgase bezeichnet und die sich dadurch von anderen Elementen unterscheiden, daß sie mit diesen keine chemischen Verbindungen eingehen.

Entdeckt wurde die Emanation von Dorn im Jahre 1900, ohne daß man zu Anfang recht wußte, was es mit diesem Stoff für eine Bewandtnis habe. Erst allmählich stellte sich heraus, daß sie sich genau wie ein Gas verhält. Rutherford und Soddy gelang es, durch Abkühlung die Emanation zu verflüssigen. Sie leiteten sie dabei durch eine mittels flüssiger Luft gekühlte Röhre. Dort kondensierte sich die Emanation als klare durchsichtige Flüssigkeit. Bei einer Temperatur von —62° Celsius beginnt sie zu sieden und verwandelt sich dann wieder in Gas. Ihre kritische Temperatur beträgt +104°, das bedeutet folgendes: Bei einer Temperatur über 104° läßt sich die Emanation durch keinen Druck so stark zusammenpressen, daß sie flüssig wird. Unterhalb 104° gelingt es, sie durch starken Druck, der immer geringer wird, je niedriger die Temperatur ist, in den flüssigen Zustand überzuführen. Nebenher sei bemerkt, daß die kritische Temperatur der Kohlensäure +30,9° und der Luft —140° ist. Deswegen gelingt die Verflüssigung der Kohlensäure relativ leicht, die der Luft und des Heliums insbesondere mit einer kritischen Temperatur von —268° gelang erst, als es möglich war, derart tiefe Temperaturen herzustellen.

Die flüssige Emanation ist sehr schwer, da sie fünfmal so dicht ist wie Wasser. Kühlt man sie bis —71° ab, so wird sie fest. Im flüssigen wie im festen Zustand leuchtet sie glänzend, und zwar bei —71° mit stahlblauer Farbe.

Die Emanation hat ein bestimmtes Spektrum, auf das wir weiter unten zu sprechen kommen werden. Jedes Gramm Radium entwickelt in einem abgeschlossenem Gefäß 0,6 Kubikmillimeter Emanation, die im Gleichgewicht mit dem Radium ist. Ist diese Menge vorhanden, bildet sich stets ebenso viel neue Emanation wie alte zerfällt. Sie sendet im wesentlichen nur α-Strahlen aus, mit einer Reichweite von etwa 4,2 Zentimeter.

Von den gewöhnlichen Gasen unterscheidet sich die Emanation nur durch ihre Lebensdauer. Sie hat nämlich eine Halbwertszeit von nur 3,85 Tagen. Es ist also ein recht kurzlebiger radioaktiver Stoff, den man schlecht aufbewahren kann. Sie wird vielfach zu medizinischen Zwecken gebraucht, indem sie in Wasser aufgelöst, genau so wie die Kohlensäure z. B. in vielen Mineralwässern, zu Trinkkuren ver-

wendet wird. Solches emanationshaltige Wasser kann man sich also nicht auf Vorrat legen, sondern muß es schnell verbrauchen (vgl. S. 38).

Die Emanation verwandelt sich dann weiter in den sogenannten aktiven Niederschlag des Radiums, wobei Ramsay und Soddy unmittelbar das Entstehen von Helium nachgewiesen haben. Sie füllten eine Geißlerröhre mit Emanation und konnten, indem sie einen elektrischen Strom hindurchleiteten, direkt das Spektrum der Emanation im Spektralapparat beobachten und photographieren. In der Abb. 15 sieht man oben die Spektrallinien der Emanation. Nach einiger Zeit verschwand dieses Spektrum immer mehr und mehr, und es trat ein neues Spektrum auf, das mittlere der Abbildung, das, wie ein Vergleich mit bekannten Spektren ergab, das Spektrum des Heliums war. Zum Vergleich ist unten in der Abbildung das Spektrum des Wasserstoffes aufgenommen. So ist unmittelbar nachgewiesen, wie Helium bei der Verwandlung der Emanation entsteht.

Was ist aber nun übrig geblieben? Das ist der schon erwähnte aktive Niederschlag des Radiums, wiederum ein fester Körper, der sich auf den Wänden des Gefäßes niederschlägt, in dem die Emanation aufbewahrt wird.

Eine genauere Untersuchung dieses aktiven Niederschlags läßt verschiedene Umwandlungsstufen erkennen. Zunächst das Radium A, das unmittelbar aus der Emanation entsteht, das α-Strahlen von 4,75 Zentimeter Reichweite aussendet und eine Halbwertszeit von nur 3 Minuten hat; es verwandelt sich in das Radium B mit 26,8 Minuten Halbwertszeit, das unter Aussendung von β- und γ-Strahlen in Radium C zerfällt, das eine Halbwertszeit von 19,5 Minuten hat, und das α-Strahlen von der größten Reichweite in der Uranreihe, nämlich 6,94 Zentimeter aussendet. Diese drei Produkte bezeichnet man als den schnell zerfallenden aktiven Niederschlag. Neuere Untersuchungen ergaben, daß Radium C tatsächlich aus zwei Stufen, Radium C_1 und Radium C_2, letzteres von nur etwa einer Minute Halbwertszeit besteht.

Radium C zerfällt dann weiter in Radium D, auch Radioblei genannt, mit einer Halbwertszeit von 16,5 Jahren. Es sendet ganz langsame, und sehr wenig durchdringende β-Strahlen aus.

Dieses zerfällt weiter in Radium E, das kräftige β- und schwache γ-Strahlen aussendet und eine Halbwertszeit von 5 Tagen hat.

Das folgende Produkt ist das Radium F, das schon länger bekannt war, ehe man wußte, daß es ein Abkömmling des Radiums ist, das Polonium. Es wurde etwa gleichzeitig mit dem Radium von Frau Curie entdeckt, wurde indessen nur in wesentlich geringerer Menge als dieses dargestellt. Wie das Radium stets mit Barium verbunden ist, so ist das Polonium der Begleiter des Wismuts. Marckwaldt hat aus 15000 Kilogramm Pechblende 3 Milligramm Polonium erhalten können. Ein Beispiel für die enorme Aktivität dieses Produktes ist bereits oben auf S. 17 angegeben.

Polonium sendet nur α-Strahlen aus mit einer Reichweite von

3,77 Zentimeter. Es hat eine Lebensdauer von 136 Tagen und zerfällt dann in ein Endprodukt Radium G, das nicht mehr radioaktiv ist. Wir sind damit zu dem Schluß der Uranreihe gekommen. Und da treffen wir auf einen bekannten Körper, das Endprodukt ist nämlich Blei, ein sehr überraschendes Ergebnis, daß das lange bebekannte Element Uran sich allmählich in das noch länger bekannte Element Blei verwandelt hat. Es sind beides Stoffe, die man schon

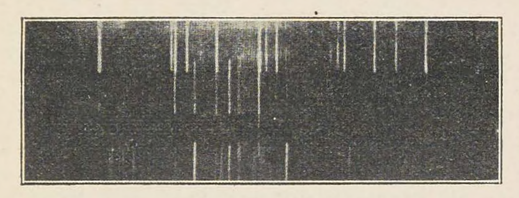


Abb. 15.
Spektrum der Emanation und des Heliums.
(Nach Soddy.)

lange ohne jede Kenntnis der Radioaktivität genau kannte! Es wird aber etwas verständlicher, wenn man berücksichtigt, daß alle Uranminerale Blei enthalten, und zwar die geologisch älteren mehr als die jüngeren.

Nun zum Schluß noch eine allgemeine Bemerkung. Gelegentlich der Umwandlung der einzelnen radioaktiven Stoffe ineinander haben wir gesehen, daß viele nur unter Abspaltung eines Heliumatoms erfolgen. Das Atomgewicht solcher aufeinanderfolgenden Glieder der Uranreihe muß sich dann also genau um das Atomgewicht des Heliums, das nach den besten Messungen zu 3,99 anzusetzen ist, unterscheiden. Erfolgt der Zerfall unter Aussendung von β- und γ-Strahlen, so ist damit keine Änderung des Atomgewichtes verbunden, da beide keine praktisch merkliche Masse dem Atom entführen.

Das Uran sendet, wie oben erwähnt, Strahlen aus, die man als 2α-Strahlen bezeichnen kann, und das Ionium zerfällt unter Abspaltung eines α-Atoms in Radium. Der Unterschied des Atomgewichtes von Radium und Uran, beides gut bekannte Stoffe, muß also das Dreifache des Atomgewichtes des Heliums sein.

Ähnlich werden α-Atome frei beim Zerfall des Radiums in die Emanation, der Emanation in Radium A, des Radium A in Radium B, des Radium C in Radium D und des Polonium in Blei, im ganzen also fünf.

Setzt man die Atomgewichte von Uran und Helium zu 238,5 und 3,99 an, so muß das von Radium $238{,}5 - 3 \times 3{,}99 = 226{,}53$ sein und weiter, da das Atomgewicht von Blei 207,10 ist, muß demnach das von Radium $207{,}10 + 5 \times 3{,}99 = 227{,}05$ sein. Es besteht also zwischen beiden Zahlen noch eine merkliche Differenz, die auch aus dem Grunde

einer Aufklärung bedarf, um festzustellen, ob jene Zerfallstheorie in allen Teilen zutreffend ist.

Zu diesem Zwecke sind zwei umfangreiche Arbeiten unternommen worden. Die eine von Hönigschmidt im Wiener radiologischen Institut mit Mengen von etwas über einem Gramm Radiumchlorid, und eine von Gray und Ramsay mit etwa dem vierten Teil davon. Da die erste Arbeit im wesentlichen chemisches Interesse hat und im engen Zusammenhang mit der Frage der Reindarstellung der Radiumpräparate steht, sei auf sie nicht weiter eingegangen, sondern nur auf die zweite, die wegen der Beobachtungsmethode besonders interessant ist. Ihr Prinzip war in wenigen Worten folgendes: Es wurde ein bestimmtes Quantum Radiumchlorid in möglichster Reinheit hergestellt und genau gewogen. Sodann wurde diese Menge vollständig in Radiumbromid chemisch übergeführt und wieder gewogen. Da man die Atomgewichte von Chlor und Brom kennt, kann man aus der dabei eintretenden Gewichtsänderung das Atomgewicht des Radiums berechnen.

Eine Schwierigkeit bot dabei noch das stets vorhandene Barium, das sich von dem Radium nicht vollständig trennen läßt und an der chemischen Reaktion mit teilnimmt. Indessen läßt sich das von ihm vorhandene Quantum auch in Rechnung ziehen.

Bei dieser Methode kam es im wesentlichen auf äußerst genaue Wägungen minimaler Substanzmengen an, Wägungen, bei denen die üblichen Wagen, die äußerstens 0,01 Milligramm Genauigkeit geben, längst nicht mehr ausreichen. Die Beobachter konstruierten sich infolgedessen nach den Angaben von Steele und Grant eine sogenannte Mikrowage. Es ist das eine Wage wohl in der Form wie die gegebräuchlichen, aber wesentlich kleiner, bei welcher der Wagebalken aus ganz feinen Quarzstäbchen und -fäden zusammengesetzt ist, die mit einer Stichflamme verschmolzen sind, eine Arbeit, die natürlich eine Unsumme von Geschicklichkeit und Geduld erfordert. Die Gewichte waren ebenfalls feine Quarzfädchen. Um eine Vorstellung von ihren Größen zu erhalten, muß man berücksichtigen, daß ein Quarzfädchen von nur einem Zehntel eines Millimeters Durchmesser nur fünf Millimeter lang sein darf, wenn es ein Zehntel Milligramm wiegen soll. Und das ist noch ein im Vergleich zur Empfindlichkeit der Wage großes Gewicht.

Noch feinere Gewichtsabstufungen erhielt man auf folgende Weise: An der einen Seite der Wage hing gewissermaßen als Gewichtsschale eine kleine zugeschmolzne Quarzhohlkugel von etwa 0,15 ccm Inhalt. Die ganze Wage ist in einem luftdicht verschließbaren Gehäuse untergebracht. Nehmen wir nun an, sie sei vollständig im Gleichgewicht, und der Druck der Luft in der kleinen Quarzkugel und im Gehäuse sei der gleiche; dann wird gemäß dem Archimedischen Prinzip das Gewicht der in der Kugel eingeschlossenen Luft durch den Auftrieb der Außenluft im Gehäuse aufgehoben. Jetzt setzen wir den Luftdruck im Wagengehäuse

um ein Millimeter herab; dann wird der Auftrieb der Außenluft nicht mehr ausreichen, der eingeschlossenen Luft das Gleichgewicht zu halten, und man erreicht damit das gleiche, als ob man das Gewicht der Kugel ein wenig vergrößert hätte. Aus der Größe der Kugel und dem bekannten Gewicht der Luft kann man berechnen, daß jene Verringerung des Luftdruckes um ein Millimeter einer Gewichtszulage von 0,000255 Milligramm entsprach, also einer Größe, die durch irgendwelche praktisch herstellbaren und behandelbaren Gewichte der gebräuchlichen Art auch nicht annähernd zu erhalten ist. Die Gesamtempfindlichkeit der Wage war aber noch größer, so daß 0,000014 Milligramm abgelesen werden konnten.

Eine Wägung auf dieser Wage, die selbstverständlich schon mit Rücksicht auf die Empfindlichkeit der ganzen Anordnung gegen die geringsten Luftströmungen und gegen die Einflüsse von winzigen Staubkörnchen äußerst schwierig und zeitraubend war, ging so vor sich, daß zunächst die Wage durch Aufsetzen bzw. Abnehmen der kleinen Gewichte einigermaßen ins Gleichgewicht gebracht wurde. Das genaue Gleichgewicht wurde dann durch Änderung des Luftdrucks hergestellt, der an einem Manometer gemessen wurde. So konnte dann das genaue Gewicht berechnet werden.

Genug, mittels dieser Wage wurde nun nach den obigen Methoden das Atomgewicht des Radiums bestimmt, und es ergab sich zu 226,36. Hönigschmidt hatte 225,95 gefunden, Frau Curie hatte bei anderen schon einige Jahre zurückliegenden Messungen genau die erste Zahl gefunden, die naturgemäß mit Rücksicht auf die noch nicht so vollkommenen Methoden der Reindarstellung von Radium etwas weniger zuverlässig wie die anderen ist. Eine Neuberechnung und Beseitigung eines Fehlers in den Gray und Ramsayschen Zahlen durch Hönigschmidt brachte indessen jene Zahlen mit seiner in gute Übereinstimmung.

Unterschiede gegen die Berechnung sind also noch ganz merklich vorhanden. Nun stehen aber Gray und Ramsay auf dem Standpunkt, daß alle bisherigen Werte für das Atomgewicht des Radiums nur als Mindestwerte anzusehen seien, und daß, je besser die Trennung des Radiums vom Barium und anderen fremden Bestandteilen erfolgt, sich auch sein Atomgewicht um so höher ergeben werde, und desto besser werde auch die Übereinstimmung mit dem theoretischen Wert sein.

Indessen ist auch etwas anderes möglich: Zunächst brauchen Helium und Blei nicht die einzigen Endprodukte des Zerfalles zu sein, sondern es können noch andere, uns bisher unbekannte Stoffe in geringen Mengen gebildet werden, wodurch dann, bis diese aufgefunden sind, die obige ganze Rechnung in sich zusammenfällt. Auch ist es möglich, daß während der Umwandlung des Urans zu Radium und des Radiums zu Blei noch andere als die uns bis jetzt bekannten Vorgänge eintreten, die diese Unstimmigkeiten hervorrufen. Endlich können die oben genannten Atomgewichte von Blei und Uran, besonders dieses, noch nicht ganz richtig sein. Wie dem auch sei, es bietet sich hier für die

Forschung noch viel Arbeit. So ist z. B. die Annahme auch nicht ohne weiteres von der Hand zu weisen, daß das aus Uran gebildete sich etwas von dem sonst vorkommenden Blei, das nicht auf diese Weise entstanden ist, unterscheidet. Da gibt es also noch mancherlei Probleme zu lösen.

Die Zerfallsreihe des Thoriums.

Nachdem wir die Uranreihe der radioaktiven Stoffe genauer kennen gelernt haben, wollen wir uns jetzt zu der zweiten Reihe, der Thoriumreihe, wenden.

Sie beginnt mit dem seit lange bekannten Element, dem Thorium, das chemisch zur Gruppe der Erdalkalimetalle gehört und in ausgedehntem Maße zur Imprägnierung der Glühkörper für Gaslicht Verwendung findet. Daß ein solcher Glühkörper radioaktiv ist, haben wir schon an anderer Stelle (Abb. 6) gezeigt. Der Nachweis der Radioaktivität des Thoriums erfolgte durch G. C. Schmidt und gleichzeitig durch Frau Curie. Zur technischen Darstellung des Thoriums verarbeitet man den in Brasilien vorkommenden Monazitsand.

Thorium sendet α-Strahlen aus mit einer Reichweite von 2,72 Zentimeter. Dabei verwandelt es sich bei einer Halbwertszeit von etwa $1{,}3 \cdot 10^{10}$ Jahren in das Mesothorium 1, das keine Strahlen auszusenden scheint, und aus diesem entsteht das β- und γ-Strahlen aussendende Mesothorium 2. Die Halbwertszeit des Mesothorium 1 beträgt 5,5 Jahre, die des Mesothorium 2 nur 6,2 Stunden.

Das Mesothorium 2 verwandelt sich in das Radiothorium, das eine Halbwertszeit von 2 Jahren besitzt und α-Strahlen mit einer Reichweite von 3,87 Zentimeter aussendet. Radiothorium verwandelt sich endlich weiter in Thorium X, das α- und β-Strahlen aussendet mit einer Reichweite von 4,3 Zentimetern. Es hat eine Halbwertszeit von 3,65 Tagen.

Zunächst wollen wir hier in der Reihe Halt machen, Von praktischer Bedeutung ist von allen diesen Stoffen nur das Mesothorium 1 und das Radiothorium, die beide eine etwas längere Lebensdauer haben. Das Mesothorium findet ja neuerdings zu medizinischen Zwecken als Ersatz des Radiums vielfache Anwendung. Seine Entdeckung erfolgte erst vor wenigen Jahren (1907) durch O. Hahn. Seitdem wird es fabrikmäßig, ähnlich wie das Radium, dargestellt.

Als Ersatz des Radiums kann Mesothorium aus dem Grunde Verwendung finden, weil es wie dieses (es sei bemerkt, daß das technische Mesothorium kein reines Präparat, sondern ein Gemisch von Mesothorium 1 und 2 und Radium ist) medizinisch verwertbare Strahlen aussendet. Von Wichtigkeit ist dabei nun der Vergleich der Strahlungsfähigkeit eines solchen Mesothoriumpräparates mit der eines Radiumpräparates. Praktisch erfolgt diese Vergleichung so, daß man feststellt, wie stark die von den beiden Präparaten ausgesandten Strahlen sind. Es ist klar, daß das Mesothorium, das so viel schneller zerfällt

wie das Radium, auch viel intensiver strahlen muß, und da hat sich herausgestellt, daß bei gleichen Gewichtsmengen Mesothorium und Radium jenes etwa 300mal so stark Strahlen aussendet; d. h. ein Milligramm Mesothorium strahlt etwa ebensoviel Strahlen aus wie 300 Milligramm Radium.

Für medizinische Anwendungen des Mesothoriums muß noch berücksichtigt werden, daß seine Lebensdauer nur recht kurz ist, indem es in 5,5 Jahren zur Hälfte zerfällt, so daß also seine Strahlung schnell abnimmt. Aber, wie schon oben angedeutet, ist das im Handel befindliche Mesothorium nicht rein (das länger ausdauernde Mesothorium 1 sendet ja anscheinend überhaupt keine Strahlen aus), sondern ein Gemisch, wobei etwa ein Viertel der Substanz Radium ist, das bei den chemischen Vorgängen bei der Darstellung aus den Ausgangsmineralien mit ausgeschieden wird und sich von dem Mesothorium nicht trennen läßt. Es stellen sich dabei recht komplizierte Gleichgewichtszustände zwischen dem Radium, dem Mesothorium 1 und 2 und dem Radiothorium ein, die zur Folge haben, daß die Halbwertszeit dieses gesamten Produktes etwa 20 Jahre beträgt, eine Zeit, mit der man immerhin schon recht zufrieden sein kann. Da der Preis von Mesothorium ganz erheblich billiger beim Vergleich seiner Strahlungsfähigkeit mit der des Radiums ist, so spielt der Verlust an Strahlung in jener Zeit eine nicht so bedeutende Rolle. Man muß indessen auch berücksichtigen, daß die Art der Strahlung bei beiden Stoffen merklich verschieden ist.

Kehren wir nach dieser Abschweifung wieder zur Betrachtung der einzelnen Glieder der Thoriumreihe zurück. Das letzte erwähnte Produkt war das Thorium X. Auch hier entsteht jetzt, ähnlich wie die Radiumemanation, ein Gas, die Thoriumemanation, mit der außerordentlich kurzen Halbwertszeit von 54 Sekunden. Praktisch ist sämtliche entstehende Thoriumemanation also in einigen Minuten wieder verschwunden. Genau wie jene verhält sich auch diese Emanation wie ein Gas, und zwar wie eines der Edelgase. Man kann sie in keine chemische Verbindung zwingen, und sie bleibt auch, wie festgestellt ist, bei der Temperatur der Weißglut unverändert. Bei —120° läßt sie sich verflüssigen. Ihr Atomgewicht ist noch nicht genau bekannt, muß aber offenbar nahe an dem der Radiumemanation, also etwa 220, liegen. Sie sendet nur α-Strahlen von 5,0 Zentimeter Reichweite aus. Wegen ihrer kurzen Lebensdauer kann sie irgendwelche Verwendung kaum finden. Sie läßt sich wohl aus Thoriumpräparaten erhalten und kann dann sofort beim Entstehen medizinisch zum Einatmen benutzt werden.

An die Thoriumemanation schließt sich dann wieder eine Reihe neuer fester Körper an, die man genau wie beim Radium als aktiven Niederschlag bezeichnet.

Das Thorium A ist insofern interessant, als es eine Halbwertszeit von nur 0,14 Sekunden hat. Es wurde von Geiger mittels einer sehr interessanten Methode entdeckt. Er ließ einen Draht in Kreisring-

form sich schnell mit seiner unteren Hälfte in einem Gefäß drehen, das Thoriumemanation enthielt. Der obere Teil des Ringes wurde dicht an einem Leuchtschirm vorbeigeführt. Der Kreisring wurde negativ elektrisch geladen, und auf ihn schlugen sich in der Emanationsluft die aktiven Niederschläge nieder. Sie wurden dann durch die Drehung sofort an den Leuchtschirm gebracht und versetzten diesen in Leuchten. Infolge der nur kurzen Zeit, die jeder Teil des Drahtes in der Emanation zubringt, schlägt sich auf ihm nichts als das erste Zerfallsprodukt, eben jenes Thorium A nieder, es bringt dann auf eine kurze Strecke den Leuchtschirm zum Leuchten, da es ja sofort wieder zerfällt, und dieser Teil des Ringes taucht, wieder frei von jedem aktiven Stoff, in die Emanation ein. Aus der Drehgeschwindigkeit des Ringes und der Strecke, auf der die Leuchtmasse leuchtete, gelang es Geiger, die Lebensdauer des ersten Zerfallsproduktes festzustellen. Es sendet nur α-Strahlen von 5,7 Zentimeter Reichweite aus.

Thorium A zerfällt in Thorium B, das β- und γ-Strahlen aussendet und eine Halbwertszeit von 10,6 Stunden besitzt.

Thorium B zerfällt in Thorium C, das α-, β- und γ-Strahlen aussendet, und eine Halbwertszeit von 60 Minuten hat. Offenbar besteht es, wie Radium C, aus diesem, also besser als Thorium C_1 bezeichneten Stoff und einem zweiten, Thorium C_2, mit ganz kurzer Lebensdauer. Die Reichweite der α-Strahlen von Thorium C_1 beträgt 4,8 Zentimeter; Thorium C_2 sendet anscheinend nur α-Strahlen von der großen Reichweite von 8,6 Zentimeter aus.

Thorium C zerfällt in Thorium D, das β- und γ-Strahlen aussendet, eine Halbwertszeit von 3,1 Minuten hat und in das letzte inaktive Glied der Thoriumreihe zerfällt.

Thorium hat ein Atomgewicht von 232,5; und α-Strahlen entstehen bei folgenden Umwandlungen: Thorium in Mesothorium 1, Radiothorium in Thorium X, Thorium X in Emanation, Emanation in Thorium A, Thorium A in Thorium B und Thorium C in Thorium D; insgesamt gibt jedes Thoriumatom bei seiner Umwandlung in den inaktiven Restkörper seiner Reihe 6 Heliumatome ab. Das Atomgewicht dieses letzten Stoffes muß also $232{,}5 - 6 \cdot 3{,}99$ (3,99 Atomgewicht des Heliums) $= 208{,}6$ sein. Das ist aber das Atomgewicht des Wismuts, eines sehr lange bekannten Elementes, das auch in vielen radioaktiven Mineralien zu finden ist, und das wir also als das Schlußglied der Reihe anzusehen haben.

Die Zerfallsreihe des Aktiniums.

Hieran anschließend soll dann gleich die dritte, zur Zeit noch am wenigsten bekannte Reihe, die Aktiniumreihe, angeschlossen werden, Sie unterscheidet sich indessen derart von den beiden anderen Reihen, daß deren Ausgangsstoffe, Uran und Thorium, ursprüngliche Elemente sind, dem Aktinium dagegen ein solcher Charakter nicht zugesprochen werden kann. Wir müssen annehmen, daß das Aktinium ein dem

Uran verwandter Körper ist und irgendwie aus ihm entsteht. Es kommt in allen Uranmineralien vor, indessen, im Vergleich zu den darin enthaltenen Stoffen der Radiumreihe, nur in ganz geringfügigen Mengen. Seine Halbwertszeit beträgt anscheinend etwa 30 Jahre. Entdeckt wurde es gleichzeitig von Debierne und Giesel. Chemisch gehört es zur Klasse der seltenen Erden und steht dem Element Lanthan nahe. Ein Aussenden von Strahlen ist bei ihm bisher noch nicht nachgewiesen.

Aus ihm bildet sich das Radioaktinium mit einer Halbwertszeit von 19,5 Tagen, das α-Strahlen von 4,6 Zentimeter Reichweite und sehr schnell absorbierbare β-Strahlen aussendet.

Daran schließt sich das Aktinium X mit 10,2 Tagen Halbwertszeit und α-Strahlen von 4,4 Zentimeter Reichweite.

Daraus entsteht wieder die gasförmige Aktiniumemanation, die in ihren Eigenschaften mit den beiden andern ganz übereinstimmt. Sie hat eine noch kürzere Halbwertszeit als diese von nur 3,9 Sekunden und sendet α-Strahlen von 5,7 Zentimeter Reichweite aus.

Ihr schließt sich der aktive Aktiniumniederschlag an, der mit dem Thoriumniederschlag nahe übereinstimmt. Zunächst das Aktinium A mit nur 0,002 Sekunden Halbwertszeit, der kurzlebigste aller radioaktiven Stoffe, der von Moseley und Fajans entdeckt ist; es sendet α-Strahlen von 6,5 Zentimeter Reichweite aus.

Darauf folgt das Aktinium B mit 36 Minuten Halbwertszeit, das β-Strahlen aussendet.

Aus diesen entsteht das Aktinium C, das eine Halbwertszeit von 2,1 Minuten besitzt und α-Strahlen von 5,4 Zentimeter Reichweite aussendet.

Der darauf folgende Stoff ist das Aktinium D, das β- und γ-Strahlen aussendet und eine Halbwertszeit von 4,71 Minuten hat. Das letzte sich hieran anschließende inaktive Produkt der Aktiniumreihe ist noch nicht bekannt.

Wegen der ganz verschwindend geringen Mengen, in denen die Stoffe der Aktiniumreihe bisher bekannt sind, hat keiner von ihnen irgendwelche weitergehende praktische Bedeutung erlangt.

Neben diesen bisher erwähnten Stoffen sind neuerdings noch einige sehr bekannte aufgetaucht, denen man auch radioaktive Eigenschaften glaubt zuschreiben zu können. Vom Kalium und Rubidium weiß man es nahezu sicher, auch das Natrium ist verdächtig. Es soll darauf nicht weiter eingegangen werden, da noch zu wenig darüber bekannt ist.

Verschiedene dieser Stoffe aus den einzelnen Reihen zeigen bemerkenswerte Ähnlichkeiten, so das Jonium, das Radiothorium und das Radioaktinium. Alle drei sind chemisch nicht zu trennen. Sie senden alle α-Strahlen aus und zerfallen in die wiederum gleichen Stoffe, das Radium, Thorium X und das Aktinium X, auch diese sind wiederum chemisch gleiche, dem Barium nahestehende Erdalkalimetalle. Sie geben wiederum α-Strahlen ab, und zerfallen dann in die drei

gasförmigen Emanationen, alles drei Edelgase. Dann entstehen die aktiven Niederschläge mit sehr kurzer Lebensdauer. Endlich entstehen, allerdings in der Radiumreihe eine größere Anzahl Körper, als in den beiden andern, die langlebigen aktiven Niederschläge, bis die Endglieder wieder alle sehr ähnlich sind. Ob da nicht noch in diesen beiden Reihen einige Zwischenglieder fehlen?

Jedenfalls scheinen diese Ähnlichkeiten nicht nur zufälliger Art zu sein. Wir müssen annehmen, daß in dem Atomaufbau der einzelnen Körper gewisse Ähnlichkeiten vorhanden sind, die diese Gleichheiten befriedigend erklären können. Vorläufig wissen wir darüber noch nichts und müssen abwarten, was uns die weitere Forschung lehrt.

Tabelle der radioaktiven Stoffe.

Uranreihe				Thoriumreihe				Aktiniumreihe			
Name	Strahlung	Reichweite d. α-Strahlen	Halbwertszeit	Name	Strahlung	Reichweite d. α-Strahlen	Halbwertszeit	Name	Strahlung	Reichweite d. α-Strahlen	Halbwertszeit
		cm				cm				cm	
Uran 1	α	2,5	$5 . 10^9$ J.	Thorium	α	2,72	$1,3 . 10^{10}$ J.				
Uran 2	α	2,9	10^6 J. (?)								
Uran Y	β	—	1,5 Tg.	Mesoth. 1	—	—	5,5 J.				
Radiouran	?	—	?	Mesoth. 2	β, γ	—	6,2 Std.	Aktinium	—	—	etwa 30 J. (?)
Uran X	β, γ	—	24,6 Tg.								
Jonium	α	3,0	$2 . 10^5$ J.	Radiothor.	α	3,87	2,0 J.	Radioakt.	α, β	4,6	19,5 Tg.
Radium	α, β	3,3	1800 J.	Thorium X	α, β	4,3	3,65 Tg.	Aktin. X	α	4,4	10,2 Tg.
Radiumemanation	α	4,2	3,85 Tg.	Thoriumemanation	α	5,0	54 Sek.	Aktiniumemanation	α	5,7	3,9 Sek.
Radium A	α	4,75	3,0 Min.	Thorium A	α	5,7	0,14 Sek.	Aktin. A	α	6,5	0,002 Sek.
Radium B	β, γ	—	26,8 Min.	Thorium B	β, γ	—	10,6 Std.	Aktin. B	β	—	36 Min.
Radium C	α	6,94	19,5 Min.	Thor. C_1	α, β, γ	4,8	60 Min.	Aktin. C	α	5,4	2,1 Min.
Radium C_1	β	—	1,4 Min.	Thor. C_2	α	8,6	? (sehr kurz)				
Radium D	β	—	16,5 J.	Thorium D	β, γ	—	3,1 Min.	Aktin. D	β, γ	—	4,71 Min.
Radium E	β, γ	—	5 Tg.								
Radium F (Polonium)	α	3,77	136 Tg.								
(Blei)	—	—	—	(Wismut)	—	—	—				

V. Kapitel.

Biologische und medizinische Anwendungen der radioaktiven Stoffe.

Schon vor der genaueren Kenntnis der radioaktiven Strahlungen war es bekannt, daß die Röntgenstrahlen, wie sie die Röntgenröhre lieferte, auf organische Stoffe recht merkliche Wirkungen ausüben. Leider merkte man das erst später in recht unglücklicher Weise. Denn ein großer Teil der Gelehrten und Praktiker, die sich um die Einführung der Röntgenstrahlen in die praktische Medizin große Verdienste erworben haben, und während der Beschäftigung mit diesen Strahlen ebenso wie ihre Patienten ständig von ihnen bestrahlt wurden, merkten bald, leider teilweise zu spät, daß diese Strahlen die Eigenschaft haben, die Haut, die sie längere Zeit treffen, schwer zu verbrennen. Es entstehen bösartige Geschwüre, die schlecht heilen, durch Operation meistens nicht zu beseitigen sind und teilweise langsam weiterfressen. Naturgemäß waren zunächst die Hände der betreffenden die gefährdetsten Teile, und eine Anzahl der Betroffenen konnte von Glück sagen, daß sie mit dem Verlust einer Hand oder eines Armes davon gekommen sind. Mehrere sind sogar so schwer verbrannt worden, daß sie nach langem Leiden verstorben sind.

Nachdem man dieses erkannt hatte, war ja ein besserer Schutz ohne weiteres gegeben. Genügend dicke Bleiplatten halten genau so wie die radioaktiven Strahlen auch die Röntgenstrahlen zurück und eine genügende Vorsicht, beides ist ausreichend, um einer Wiederholung solcher beklagenswerten Unfälle vorzubeugen; und man hat auch in den letzten Jahren von neu entstandenen Opfern nichts gehört.

Dagegen erkannte man, daß eine vorsichtige Anwendung der Röntgenröhre zu Bestrahlungen ein durchaus empfehlenswertes Hilfsmittel zur Beseitigung mancher Krankheiten, besonders der Haut, ist. Eine geeignete Bestrahlung unter sorgsamster Beaufsichtigung seitens des Arztes kann gegen solche vorzügliche Dienste tun.

Dabei lag es dann auch nahe, die radioaktiven Stoffe daraufhin zu prüfen, ob sie nicht die gleichen Dienste verrichten könnten. Die Röntgenröhre ist ein sehr unhandliches Instrument, mit der man nicht ohne weiteres nahe genug an alle zu bestrahlenden Stellen herankommt. Außerdem ist ihre Anwendung nicht ganz gefahrlos. Denn sie muß ja mit zwei Zuleitungen versehen sein, die hochgespannten elektrischen Strom führen, deren Berührung die schwersten Folgen haben kann.

Radioaktive Präparate haben dagegen die gewaltigen Vorzüge, daß sie klein sind, an allen Stellen sich äußerst bequem unterbringen lassen, daß die Bestrahlungen leicht sehr lange ausgedehnt werden können, daß ihr Berühren selbstverständlich ganz ungefährlich ist, und, was von größter Wichtigkeit ist, daß die Stärke der Strahlung, deren

Veränderung überdies ganz genau bekannten Gesetzen folgt, durch geeignete Filter aus Metall und andern Stoffen, die einen Teil der wirkenden Strahlen den Durchgang verwehren, leicht verändert und sicher kontrolliert werden kann, während die Strahlung der Röntgenröhre dauernd starken, schwer meßbaren Schwankungen unterliegt.

Von den radioaktiven Stoffen kommen im wesentlichen folgende in Frage: Zunächst natürlich das Radium als Salz in der Form von Radiumbromid oder Radiumchlorid oder Radiumsulfat, sodann das Mesothorium, das wir zur Zeit nicht ohne einen gewissen Radiumgehalt darstellen können, was aber wiederum den Vorteil hat, seine Lebensdauer günstig zu beeinflussen (vgl. S. 51), und bisweilen das Thorium X und Radiothorium. Die Thoriumemanation kommt wegen ihrer zu kurzen Lebensdauer (Halbwertszeit 54 Sek.) nicht in Frage, wohl aber die Radiumemanation mit der wesentlich längeren Halbwertszeit von 3,85 Tagen. Die festen Radium- und Thoriumpräparate dienen natürlich in erster Linie zu Bestrahlungen oder auch in geeigneten Lösungen zu Einspritzungen; die Emanation in der Form, daß sie, in Wasser gelöst, zu Trinkkuren und Bädern, oder auch unmittelbar in gasförmiger Form mit Luft gemischt zum Einatmen, Inhalieren, dient, daneben auch noch in der eigenartigen Form, daß man die festen Niederschläge, die sie bei ihrem Zerfall liefert, in möglichst großen Mengen auf die Haut der unbekleideten Patienten konzentriert. Man macht das so, daß man diese auf isolierten Stühlen in einem emanationshaltigen Raum Platz nehmen läßt und sie auf eine hohe negative elektrische Spannung bringt. Dann werden von der Haut die elektropositiven*) wirkenden Bestandteile der zerfallenden Emanation angezogen, und der Erfolg ist der, daß man dort etwa viermal mehr radioaktive Niederschläge nachweisen kann, als ohne die angelegte elektrische Spannung.

Es bedarf wohl keiner Erwähnung, daß die weitverbreitetste Ausnutzung einer Heilwirkung radioaktive Stoffe in der Anwendung radioaktiver Quellwässer zu suchen ist. Eine sehr große Anzahl von Heilquellen, die aus der Erdtiefe kommen, durchströmt radiumhaltige Gesteine, löst einen Teil der allerdings sehr schwer löslichen Radiumsalze und bringt ihn so zur Erdoberfläche; so kann man diese zu Radiumbädern und Trinkkuren verwenden, und außerdem enthält derartiges Wasser, wie es naturgemäß immer der Fall ist, das von dem zerfallenden Radium herrührende Emanationsgas gelöst, und dieses kann bei Trinkkuren und Bädern ausgenutzt werden, außerdem kann es durch geeignete Behandlung des Wassers frei gemacht und zum Einatmen Verwendung finden. Der „Brunnengeist", dem man früher, als man von den wahren Ur-

*) Es dürfte merkwürdig erscheinen, daß die Emanation in positiv elektrische Heliumatome und in aktiven Niederschlag zerfällt, der ebenfalls elektrisch positiv ist. Es ist das jedenfalls experimentell festgestellt, eine befriedigende Erklärung dafür fehlt noch.

sachen der Heilwirkung mancher Quellen noch keine Vorstellung hatte, den Grund für die vielfältigen krankheitslindernden Wirkungen der Quellen zuschrieb, taucht hier wieder in neuer Gestalt auf; jetzt wirklich ein „Geist", nämlich ein Gas, und überdies das merkwürdigste Gas, das die Wissenschaft überhaupt kennt!

Gehen wir nun auf die Wirkungen radioaktiver Stoffe auf den Organismus im einzelnen ein! Zunächst noch eine allgemeine Vorbemerkung. Man liest vielfach, daß mit der Einführung des Radiums und der ähnlichen Stoffe in die Heilkunde nunmehr das allgemeine unbedingt sicher wirkende Mittel gefunden ist, das so manche Krankheit heilt, die bisher den Bemühungen der Ärzte getrotzt hat, und deren vollständige Ausrottung nur noch an den allzu hohen Preisen der Heilmittel aus den radioaktiven Stoffen scheitert. Vor solchen Annahmen kann nicht genug gewarnt werden! Wohl hat die Medizin ein bereits jetzt nach wenigen Jahren Erprobung unentbehrlich gewordenes Hilfsmittel für einige wenige Krankheiten darin gefunden, aber ein stets unbedingt zuverlässiges noch längst nicht. Es ist ja leider der Fall, und auch bei der Anwendung des Radiums zu Heilzwecken nicht zum erstenmal, daß es teilweise zum Gegenstand geschäftlicher Spekulation geworden ist, daß solche Präparate zu über Gebühr hohen Preisen abgegeben werden, bzw. die versprochene Wirksamkeit auch nicht annähernd haben. Überdies gehört zu einer sachgemäßen Anwendung eine sehr reiche Erfahrung, wie sie nur wenige haben, und wenn eine solche nicht vorhanden ist, kann der Erfolg der Behandlung, die meistens naturgemäß recht teuer ist, entweder ganz ausbleiben, oder es können zu dem alten Leiden noch neue infolge unrichtiger Behandlung hinzukommen.

Beginnen wir mit der Einwirkung von Radiumstrahlen auf Bakterien. Das durch die Abb. 16 erläuterte Experiment soll ein Beispiel der Wirkung sein. Auf einem Nährboden wurden in Kreuzform Bakterien wie bei a eingeimpft und in die Mitte wie bei b ein Radiumpräparat in einer runden Kapsel gebracht. Ein Teil der Strahlung wurde durch die (schraffierte) Kupferblende von 0,06 mm Dicke abgeblendet. Man sieht dann bei c, wie der durch die Blende geschützte senkrechte Impfstrich sich vollständig entwickelt hat, und wie die Bakterien üppig gewuchert sind, während bei dem wagerechten die unmittelbar unter der Radiumkapsel liegenden, von der Blende nicht geschützten, abgetötet sind, während die entfernter liegenden Teile sich gut ausgebildet haben, und zwar um so besser, je weiter sie entfernt lagen. Pfeiffer und Friedberger wiesen nach, daß Typhus- und Cholerabazillen durch Radiumstrahlen getötet werden, wenn sie ausreichend bestrahlt worden sind. Auch Milzbrandbazillen werden abgetötet, allerdings erst nach merklich längerer Bestrahlung. Gewisse Bazillenarten werden aber anscheinend nicht wesentlich beeinflußt. Zu diesen gehören anscheinend die Tuberkelbazillen. Indessen ist es absolut unzulässig, diese mehr theoretischen Ergebnisse auf praktische Fälle anwenden zu

wollen, denn derartige Bestrahlungen oder Einspritzungen radioaktiver Stoffe in den infizierten menschlichen Körper dürften meistenteils höchst unerwünschte Folgen haben.

Eine praktische Anwendung haben derartige Ergebnisse indessen zufällig gefunden. Schimmelpilze werden leicht abgetötet; das hat man nämlich ohne jede Absicht so gemerkt, daß in den Gruben in Joachims-

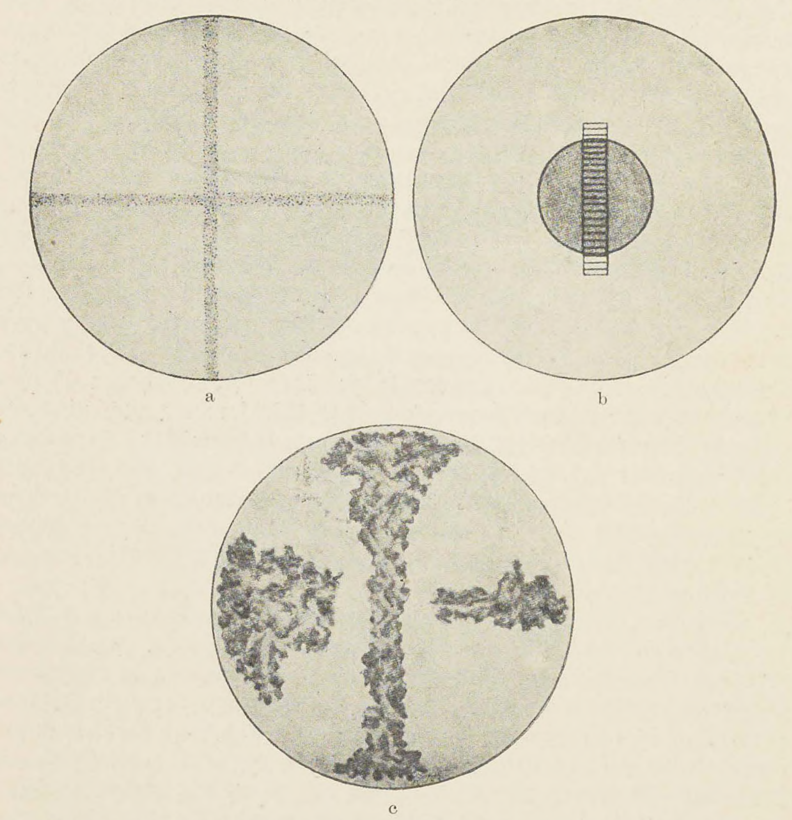


Abb. 16. Radiumbestrahlung von Bakterien (bacillus prodigiosus).
(Nach Aschkinaß und Caspari.)

thal hölzerne Grubenstützen in stark radioaktivem Wasser jahrzehntelang von jedem Schimmel verschont geblieben sind.

Vielfach sind weiterhin die Einflüsse von solchen Bestrahlungen auf Pflanzensamen geprüft; auch hier gelingt es meistens, solche durch genügende Bestrahlung zum Absterben zu bringen und ihnen so ihre Keimfähigkeit zu rauben. Bei den Pflanzen selbst gelingt es auch, ausgebildete Gewebe durch Bestrahlung im Wachstum aufzuhalten oder zu vernichten, dagegen aber auch durch andere Bestrahlung die Entwicklung mächtig anzuregen.

Vor einigen Jahren erregten die Arbeiten Butler Burkes Aufsehen. Er bestrahlte keimfrei gemachte Nährböden mit Radium, und dann bildeten sich auf ihnen bakterienähnliche Gebilde, die wie eine richtige Bakterienkultur aussahen. Es schien auch ein gewisses Wachstum vorhanden zu sein. Da glaubte man das Problem der generatio spontanea, der Urzeugung, gelöst zu haben! Aus toten Stoffen im Laboratorium lebende entwicklungsfähige geschaffen zu haben! Leider war es nur eine Phantasie. Diese zelligen Gebilde erwiesen sich nach Ramsay als mikroskopische Gasbläschen, die durch die Bestrahlung und die dabei eintretende Zersetzung des wässerigen Nährbodens in Wasserstoff und Sauerstoff entstanden. Jenes wichtige Problem, das seit der Zeit der Alchemie häufig von neuem auftaucht, ist also vom Radium, wie so manches andere, nicht gelöst.

Bei der Bestrahlung von organischen Gewebeteilen, z. B. des menschlichen Körpers, lassen sich, da einzelne Teile stark verschiedene Empfindlichkeit haben, allgemeine Regeln schlecht aufstellen. Der Vor-



Abb. 17. Radiumlarve des Frosches.
(Nach Hertwig.)

gang verläuft im einzelnen so, daß eine Bestrahlung zunächst ein vermehrtes Wachstum von Zellen verursacht; es bildet sich dann an dieser Stelle eine Entzündung aus, der ein vollständiges Absterben und Abstoßen der bestrahlten Hautteile folgt, mit einer schwer heilenden Geschwürbildung von teilweise krebsartigem Charakter. Dieser ganze Vorgang verläuft recht langsam, er dauert etwa 14 Tage; er tritt übrigens nicht sofort nach der Bestrahlung ein, sondern erst längere Zeit danach. Also neben dem Absterben von Zellen tritt auch eine Neubildung ein, bei geringerer Bestrahlung, und das ist gerade ein Umstand, der bei den Versuchen der Heilung des Krebses durch Radiumbestrahlung von Bedeutung ist, denn wenn man nicht alle krebsigen Teile zum Absterben bringt, können gerade die entfernter liegenden, weniger bestrahlten, dadurch in ihrem Wachstum merklich angeregt werden.

Biologisch sind die folgenden Ergebnisse recht interessant. Befruchtete Eier werden bei Bestrahlung, wie es von Paula Hertwig an solchen von Ascaris megalocephala (Pferdespulwurm) gezeigt ist, in ihrer Entwicklung stark zurückgehalten. Die Teilung der Eier tritt merklich verspätet auf, und sie sterben später ab. Bei stärkerer Bestrahlung erreichen sie überhaupt nicht das Stadium der Zweiteilung.

Bei Bestrahlung von Embryonen in dem Stadium, in dem sich das Nervensystem bildet, treten ganz eigenartige Mißbildungen auf, die Hertwig als Radiumkrankheit bezeichnet. Eine Vorstellung solcher Mißbildungen gibt Abb. 17, die eine normale (b) und eine bestrahlte (a) Larve eines Froscheies darstellt. k sind die rudimentär gebliebenen Kiemenhöcker, die normal gut entwickelt sind, d ist ausgestoßene Dottermasse und h der Haftnapf. Zu erwähnen ist noch, daß durch die Bestrahlung manche Organe gar nicht beeinflußt werden.

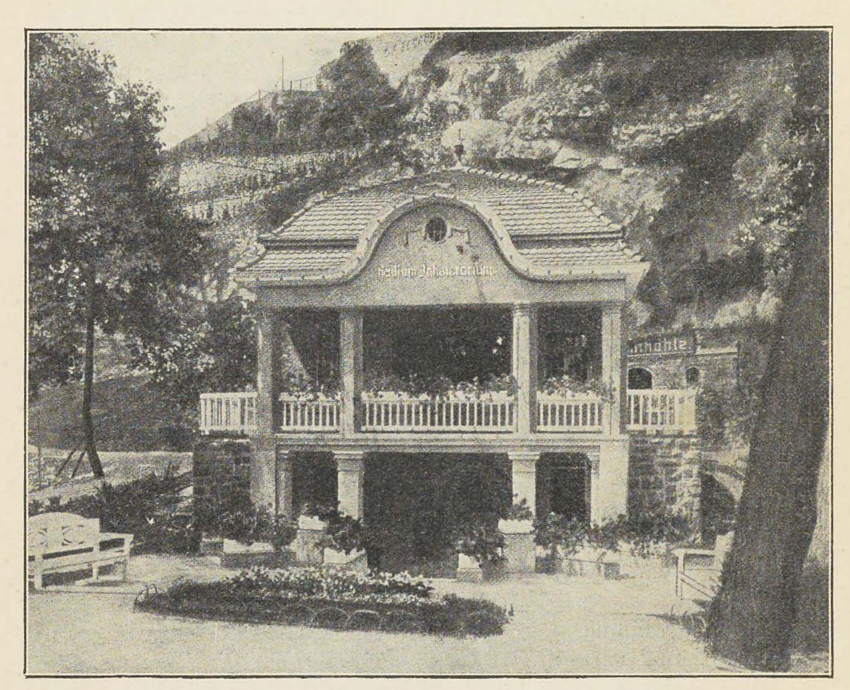


Abb. 18. Radiumemanatorium und Radiumhöhle in Bad Kreuznach.

Hertwig gibt folgende allgemeine Regeln für die Beeinflussung der Embryonen an. Wird die Bestrahlung während der Zweiteilung des befruchteten Kernes vorgenommen, so tritt eine Schädigung ein, die um so eher zum Stillstand führt, je intensiver die Bestrahlung ist. Dagegen führt eine Bestrahlung der Samenzellen allein, die zur Befruchtung eines normalen Eies dient, zu einer Verbesserung der Entwicklung. Es macht keinen Unterschied aus, ob man ein unbefruchtes Ei bestrahlt und mit einem unbestrahlten Samenfaden vereinigt oder ein normales Ei mit einem bestrahlten Samenfaden. Auf die theoretische Bedeutung dieser Ergebnisse kann nicht eingegangen werden, da diese Besprechung sehr ausgedehnt werden müßte und

uns von unserem Thema zu weit entfernte. Es muß dazu auf die Originalarbeiten Hertwigs verwiesen werden.

Wenden wir uns nunmehr zu den praktisch medizinischen Anwendungen zu therapeutischen Zwecken. Zunächst sei betont, daß die Wirkung der Heilquellen durchaus nicht immer ihrem Gehalt an Radium und Emanation parallel geht. So sind z. B. eine ganze Anzahl Quellen bekannt, die zur Linderung der Gicht großes Ansehen genießen, und gerade von diesen wird behauptet, daß sie diesen Ruhm ihrem Radiumgehalt verdanken. Das hat sich in dieser allgemeinen Fassung als nicht zutreffend herausgestellt. Neben den radioaktiven Wirkungen, unabhängig davon, ob sie überhaupt immer von Wichtigkeit

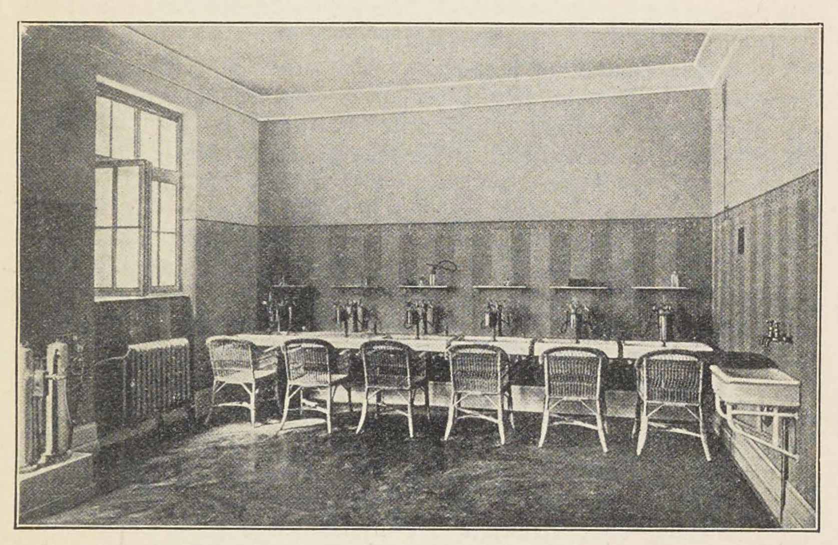


Abb. 19. Radiuminhalatorium in Bad Kreuznach.

sind, müssen noch andere hinzukommen, um wirkliche Heilerfolge zu erzielen. Zu welchen therapeutischen Zwecken die einzelnen Quellen dienen können, kann immer nur die Erfahrung lehren. Selbstverständlich können radioaktive Wässer Heilwirkungen ausüben; dann ist eine sehr geeignete Form die Trinkkur, weil in diesem Fall nach den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen die Emanation am besten in die Körpersäfte übergeführt wird, und die von ihr ausgehenden Strahlungen am intensivsten auf den Körper einwirken. Die Methode der Trinkkur soll am besten derart ausgeführt werden, daß man das emanationshaltige Wasser, über längere Zeit verteilt, durch kleine Schlückchen dem Körper zuführt und ihn so am besten mit Emanation sättigt.

Auch durch Inhalation, durch Einatmen kann man dem Körper die Emanation zuführen; entweder so, indem man einem emanations-

haltigen Wasser durch Hindurchperlenlassen von Luft die Emanation entzieht und dieses Luft-Emanationsgemisch einatmet, oder indem man emanationshaltige Luft in abgeschlossene Räume leitet, in denen die Patienten sich aufhalten. Durch die Kurdirektion des Bades Kreuznach sind mir freundlichst zwei Abbildungen zur Verfügung gestellt worden, die solche Einrichtungen zeigen. Auf der einen (Abb. 18) sieht man den Kreuznacher „Radiumberg", in den ein alter Stollen eingetrieben ist, dessen Luft sich als stark emanationshaltig erwies. Diese Luft wird in einen Emanationsraum geleitet und dort durch geeignete Vorrichtungen von den Patienten inhaliert (Abb. 19).

Gerade für die Behandlung der Gicht wird eine längere Kur mit Emanation vielfach empfohlen, indessen scheint das nicht immer zutreffend zu sein. Der Radiumgehalt sowohl der Heilquelle, wie die Wirkung der Emanation scheinen auf die Herabsetzung der gichtischen Beschwerden von nicht sehr bedeutendem Einfluß zu sein; neben diesen müssen noch andere Hilfsmittel oder andere Wirkungen der Wässer mitwirken, um eine Besserung herbeizuführen. Daß Besserungen durch geeignete Anwendung radioaktiver Stoffe erzielt werden können, soll und kann auch nicht in Abrede gestellt werden. Gerade bei Gicht und Rheumatismus werden radioaktive Heilmittel jeder Art besonders empfohlen, aber es kann auch da nur gesagt werden, daß bei objektiver Nachprüfung die dabei auftretenden Probleme noch nicht endgültig gelöst sind. Die Erfahrung macht dabei noch das meiste aus. Diese Erfahrungen erstrecken sich jetzt schon recht weit, so daß häufig schon sehr günstige Erfolge erzielt worden sind. Es gibt eine größere Anzahl wirksamer Heilquellen jeder Art, und man konnte vielfach feststellen, daß es wirklich gerade nur eine reine Erfahrungssache war, gegen welche Leiden die einzelnen Quellen gut verwendbar sind. Joachimsthaler Grubenwässer dienten schon jahrzehntelang ohne Kenntnis der radioaktiven Erscheinungen als gute Heilmittel gegen Gicht und Rheumatismus. Heute, nach der Entdeckung der Radiumlager in Joachimsthal, ist es das bedeutendste Radiumbad. Die Einwohner dort benutzten erfahrungsgemäß mit Uranpecherzen gefüllte Säckchen zum Auflegen gegen rheumatische Schmerzen! Die Einwohner von Landeck in Schlesien errichteten über ihren Quellen schon vor hundert Jahren Inhalierhäuschen für den Brunnengeist!

Was für die radioaktiven Zustände bei den Heilquellen von Wichtigkeit ist, läßt sich gerade in Joachimsthal besonders gut studieren, wenn damit auch nicht gesagt sein soll, daß dieser Ort nunmehr derjenige mit radioaktiver Heilwirkung par excellence ist. Aber es gibt anscheinend keinen zweiten genau bekannten Platz, wo die Einwirkung der radioaktiven Bodenstoffe so merklich ist. Man stellt dort fest, daß auf den alten Schutthalden, soweit sie in enger Verbindung mit Schächten stehen, aus denen Uranerze gefördert werden und die emanationsreiche Luft enthalten, ein Pflanzenleben nicht

vorhanden ist, im Gegensatz zu andern Stellen an denen Pflanzen gut gedeihen. Bei der versuchten Aufforstung gehen die Pflänzchen nicht sofort ein, sondern erst, wenn ihre Wurzeln tiefer liegende, stärker radioaktive und emanationshaltige Gesteine berühren. Daß Schimmelbildung in diesen Regionen nicht auftritt, ist schon früher erwähnt.

Von Dautwitz ist auch festgestellt worden, daß bei den Bergleuten der Joachimsthaler Bergwerke Gicht, Rheumatismus und Neuralgien nicht vorkommen sollen, trotz der oft starken Durchnässungen und Erkältungen in der Grube. Ein kurzer Aufenthalt in der Grube verursacht bei solchen, die daran nicht gewöhnt sind, leicht heftige Kopfschmerzen, Schwindelanfälle und Nasenbluten, alles Erscheinungen, die auf den starken Emanationsgehalt der Luft zurückzuführen sind.

Mit Rücksicht auf das oben erwähnte, ist denn auch eine Radiumkur bei vielen Krankheiten versucht worden. Die verschiedenen Formen des Rheumatismus sind geeignet behandelt worden und haben auch recht häufig Besserungen ergeben. Ein sicherer Erfolg, abgesehen davon, daß er vielfach bei älteren Patienten überhaupt ausgeschlossen ist, läßt sich jedenfalls nicht vorhersagen. Ein günstiges Vorzeichen für einen guten Erfolg der Kur soll es sein, wenn sich nach ihrem Beginn die Schmerzen zunächst noch steigern, um dann nachzulassen. Auch für Gicht wird eine ähnliche Behandlung vorgeschlagen mit häufig gutem Erfolg; indessen ist er auch hier nicht irgendwie sicher.

Dagegen haben örtliche Einwirkungen von Radium, also Radiumbestrahlungen, wirkliche Erfolge bei mancherlei Hautkrankheiten aufzuweisen, vorausgesetzt, daß die Behandlung von einem erfahrenen Arzte geleitet wird, so daß keine Verbrennung eintritt. Von besonderer Wichtigkeit und mit besonderem Erfolge sind solche Bestrahlungen bei Lupus und der Hauttuberkulose.

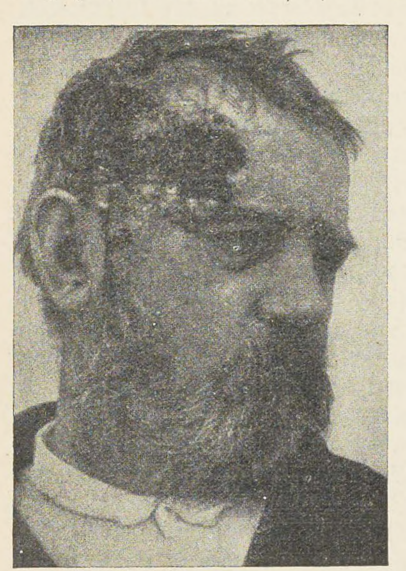
Ähnlich ist die Einwirkung bei einer der leider verbreitesten Krankheiten, dem Krebs, in den verschiedensten Formen. Insbesondere haben Wickham und Degrais bei diesen Krankheiten mehrfach glänzende Erfolge aufzuweisen. So zeigen z. B. die Abb. 20 und 21 Beispiele einer Radiumbehandlung eines tiefen Hautepithelioms, das nach 7 Monaten vollständig verschwunden war, wobei sich noch das Allgemeinbefinden dieses Patienten derart gebessert hatte, daß er an Körpergewicht um 30 kg zugenommen hat.

Wenn auch nicht in allen Fällen ein so vorzüglicher Erfolg erzielt ist, so ist es doch noch häufig genug gelungen, krebsige Entartungen, bei denen eine chirurgische Entfernung ausgeschlossen war, durch Bestrahlung so zu verändern, daß sie auf blutigem Wege beseitigt werden konnten. Auch bei Gebärmutterkrebs hat eine verhältnismäßig leicht auszuführende Radiumbestrahlung vielfach eine blutige Operation entbehrlich gemacht.

Bei dem Speiseröhrenkrebs ist zur Beseitigung der dabei auftretenden Verengerung der Speiseröhre, die bis zu einem vollständigen

Verschluß führen kann, ein mit einem stark aktiven Präparat gefülltes Röhrchen durch eine Sonde bis an die erkrankten Stellen gebracht worden, und man hat durch eine solche, für den Patienten nicht besonders unangenehme Maßnahme wesentliche Besserungen erzielt. Sogar Bestrahlung der Magenwand von innen her sind auf diesem Wege vorgenommen worden. Von wirklichen Heilungen kann man nicht immer sprechen, wohl aber von merklichen Besserungen.

Wir wollen auf alle Einzelheiten der Radiumtherapie nicht weiter eingehen, da wir uns sonst in Einzelheiten verlieren, die wohl an



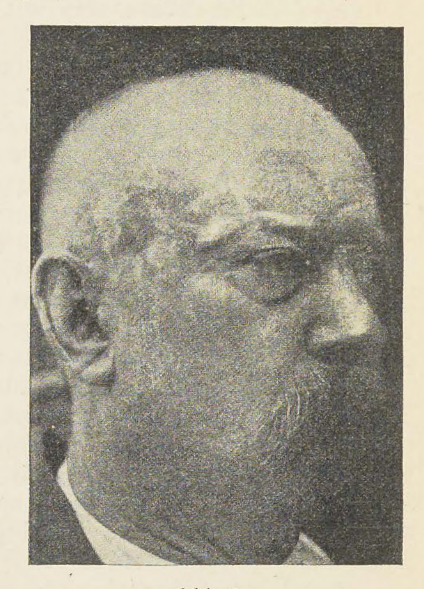


Abb. 20. Abb. 21.

Aufnahme eines Hautkrebses vor und nach der Radiumbehandlung.
(Nach Wickham und Degrais.)

sich großes Interesse bieten, aber allgemeine Regeln nicht aufzustellen gestatten. Die Radiumtherapie ist noch sehr jung. Sie hat eine große Anzahl vorzüglicher Ergebnisse, die noch viel von ihr zu hoffen gestatten, aufzuweisen, leider nur den einen Fehler, daß fast stets ihre Ergebnisse nicht immer sicher vorauszusagen sind. Von einem ungeübten Arzt sind dabei leicht schwere gesundheitliche Schädigungen oder keine Besserung zu erwarten. Man soll deswegen von allen diesen Kuren zurzeit noch nicht zu viel hoffen. Das Radium, und das gleiche gilt selbstverständlich auch von den Thoriumpräparaten, stellt eine ganz bedeutende und heute bereits schwer entbehrliche Bereicherung unseres Heilschatzes dar, die unendlichen Segen stiften kann. Deswegen soll man aber nicht bewährte alte Heilmittel verlassen, und alles Heil vom Radium erwarten.

Auch radioaktive Heilquellen sind nicht immer die besten. Wenn es sich um die reine Wirkung radioaktiver Stoffe in ihnen handelt, brauchte man kein solches Bad mehr aufzusuchen, sondern könnte die gesamte Kur fast ausnahmslos zu Hause besser und billiger durchmachen. Sicherlich kommen neben diesen Wirkungen noch eine ganze Reihe anderer mit in Frage, die einer Kur in den Badeorten selbst eine ganz bedeutende Überlegenheit verschaffen. Nur ein tüchtiger Arzt, der die Vorteile der Radiumkur gegen die anderer Methooen richtig abwägen kann, wird in allen Fällen zum Vorteil für die hilfsbedürftigen Patienten entscheiden können.

VI. Kapitel.

Radioaktive Messungen.

Es dürfte sich empfehlen, hier ein Kapitel über radioaktive Messungen einzuschalten. Wir haben vielfach Gelegenheit gehabt, darauf hinzuweisen, welche zahlenmäßigen Eigenschaften die einzelnen radioaktiven Körper haben, es ist aber bisher noch niemals davon die Rede gewesen, wie man diese wichtigen Zahlen messend hat feststellen können.

Schon bei der erstmaligen, und so auch bei allen späteren Darstellungen radioaktiver Stoffe aus ihren Ausgangsmaterialien versagten alle bekannten chemischen Methoden. Die Mengen Substanz waren eben zu geringfügig, als daß sie noch merkliche rein chemische Wirkungen hervorbringen konnten. Bei vielen anderen Arbeiten ist man zum Nachweis der geringsten Stoffmengen bereits ganz anders vorgegangen. Man beobachtete die einzelnen Stoffe an einem Spektralapparat. Man ließ z. B. zwischen den zu untersuchenden Stoffen elektrische Funken überschlagen und beobachtete diese im Spektralapparat, oder, falls er ein Gas war, oder, wenn er verdampft werden konnte, schloß man ihn in ein Geißlerrohr ein und beobachtete sein Leuchten unter dem Einfluß des Stromes. So gelang es, aus dem Auftreten bestimmter Spektrallinien auf das Vorhandensein bestimmter Stoffe zu schließen.

Aber diese Methoden sind recht kompliziert und umständlich, und teilweise haben sie auch bei den radioaktiven versagt, schon aus dem Grunde, weil ihr Verhalten gegenüber dem Spektralapparat nicht bekannt war; man wußte nicht, welche Spektrallinien den einzelnen Stoffen zukommen, was ja auch nicht weiter wunderbar ist, da es sich meistens bei den Versuchen darum handelte, neue bisher nicht bekannte Stoffe, mit ganz unbekannten Eigenschaften zum ersten Male rein darzustellen.

Da boten sich nun gleich zu Beginn ganz andere Beobachtungsmethoden. Wir haben schon früher gelegentlich darauf hingewiesen, daß die radioaktiven Stoffe durch ihre Strahlen die Luft elektrisch leitend machen, sie ionisieren; durch den Aufprall der einzelnen Strahlen auf die Molekel der Luftgase werden diesen einzelne Elektronen entzogen, sie werden positiv elektrisch, anderen werden neue Elektronen zugeführt, sie werden negativ elektrisch. Wir nennen derartige Luft, wie schon erwähnt ist, ionisierte Luft. Und die verschiedenen Meßmethoden der Radiologie beruhen im wesentlichen alle darauf, daß die zu untersuchenden Stoffe die Luft ionisieren und sie damit leitend machen, und daß wir aus ihrer Leitfähigkeit Schlüsse über diese Stoffe ziehen können, welche sie leitend machen.

Zunächst eine ganz andere Vorbemerkung. Die α-Strahlen, geladene Heliumatome, haben, wie oben vielfach angegeben, bestimmte Reichweiten in Luft, die alle nicht sehr groß sind; α-Strahlen können also die Luft nur in nächster Nähe des Präparates ionisieren. Überdies hat sich herausgestellt, daß die α-Strahlen, die in einen Körper eindringen, schnell von ihm verschluckt, absorbiert werden, und zwar um so schneller, je dichter er ist. Bei einem Körper, dessen Dichte oder spezifisches Gewicht tausendmal größer als die Luft ist, wird die Reichweite der Strahlen auch nur tausendmal kleiner sein. In der Physik beziehen wir nun die Dichte aller Stoffe auf die von Wasser, die wir zu 1 ansetzen; demgegenüber ergibt sich die Dichte der Luft etwa zu 0,0012. Haben wir also Thorium C_2, das die größte Reichweite in seinen α-Strahlen aufweist, nämlich 8,6 cm, so werden diese im Wasser z. B. nur $8{,}6 \cdot \frac{0{,}0012}{1}$ cm $= 0{,}010$ cm ungefähr reichen, also nur ein Zehntel eines Millimeters. Im allgemeinen haben alle festen Körper eine größere Dichte als 1 (Aluminium 2,7, Silber 10,5, Glas 2,5, Blei 11,3). Es werden also merkliche Wirkungen der α-Strahlen in festen Körpern und durch feste Körper hindurch nicht auftreten.

Anders ist es bei den β- und γ-Strahlen; sie werden erst schnell, dann langsam absorbiert. Man bezeichnet mit Halbierungsdicke die Dicke einer Schicht, die noch die Hälfte der Strahlung durchläßt, wobei also die Hälfte der ursprünglich vorhandenen Strahlung von der Schicht verschluckt wird. Sie beträgt z. B. bei Aluminium für die β-Strahlen der einzelnen Stoffe

Radium	0,02 mm
Radium C	0,5 „
Mesothorium	0,3 „

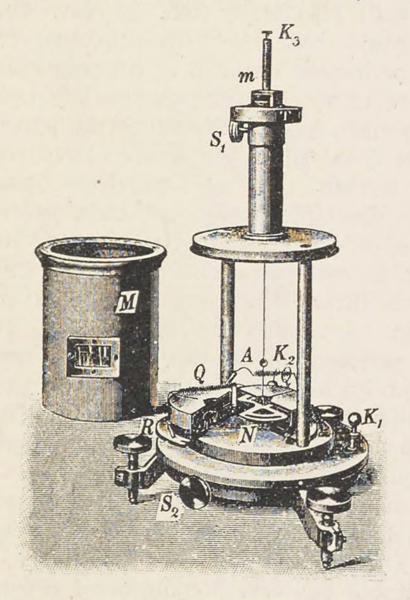
und ähnlich bei Blei (dem gewöhnlichen Schutzmittel gegen Röntgenstrahlen) für γ-Strahlen

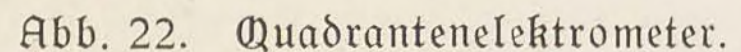
Radium C	1,3 cm
Mesothorium 2	1,1 „

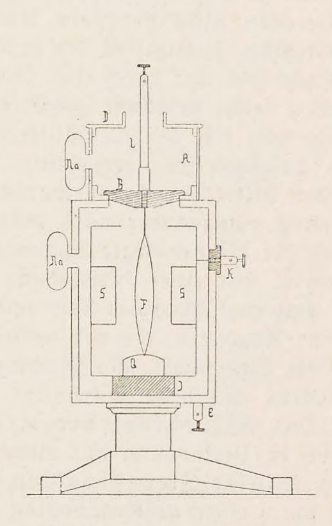
Nun ist dabei aber noch zu berücksichtigen, daß sowohl β= wie auch γ=Strahlen beim Auffallen auf feste Körper neue Strahlen erzeugen, die von dem Punkte ihres Auftreffens ausgehen, und die man als Sekundärstrahlen bezeichnet; sie haben den Charakter von β= oder γ=Strahlen. Dadurch werden die oben angegebenen Zahlen in gewisser Weise verändert.

Es ist nach vorstehendem also leicht möglich, durch Einschalten geeigneter fester Körper bestimmter Dicke, einzelne Strahlensorten abzuschirmen, und nur die anderen zur Wirkung kommen zu lassen.

Das übliche Meßinstrument für alle radioaktiven Messungen ist




Abb. 22. Quadrantenelektrometer.


Abb. 23. Fadenelekrometer.

das Elektrometer; und zwar verwendet man es in drei verschiedenen Formen, als Quadrantenelektrometer, Fadenelektrometer und Blättchenelektrometer.

Das Quadrantenelektrometer stellt die Abb. 22 dar. An einem feinen Faden schwebt horizontal eine Silberpapierscheibe N in etwa 8=Form. Sie kann im Innern eines schachtelartigen runden Gehäuses Q schwingen, das in der Abbildung der Übersichtlichkeit wegen aufgeklappt ist. Die Schachtel ist durch einen Kreuzschnitt in vier Teile, Quadranten, geteilt, die elektrisch voneinander gut isoliert sind. Zu Meßzwecken werden dann die gegenüberliegenden durch feine Spiraldrähte, wie in der Figur, miteinander verbunden. Will man nun eine elektrische Spannung messen, so wird sie an den Knopf K_3 angelegt und damit mit der „Nadel“ N in Verbindung gebracht. Diese wird da=

durch auch elektrisch geladen, und überdies wird das eine Quadrantenpaar durch den Knopf K_1 bzw. K_2 mit einer Hilfsspannung verbunden. Dieses wird durch seine elektrische Ladung auf die Nadel eine Anziehungs- oder Abstoßungskraft ausüben und sie drehen. Diese Drehung wird durch einen kleinen Spiegel A sichtbar gemacht, der sich oberhalb der Nadel an dem Faden befindet, und auf den ein feiner Lichtstrahl auffällt. Aus der Drehung der Nadel kann auf die Größe der angelegten Spannung geschlossen werden. M ist ein Gehäuse mit einem Glasfenster, das über das ganze zum Schutz gegen Einflüsse von außen übergesetzt wird.

Das Fadenelektrometer stellt schematisch Abb. 23 dar. Aus einem allseitig geschlossenen Gehäuse ragt ein Stift l heraus, der mit der zu messenden Spannung verbunden wird. B ist ein vollständig isolierendes Stück Bernstein. Unten an diesem Stift sind zwei sehr feine Quarzfäden F angesetzt, die durch einen dünnen Metallüberzug leitend gemacht sind und durch eine Feder Q auf einem isolierenden Bernsteinstück J leicht gespannt gehalten werden. Die an l angelegte Spannung teilt sich den metallisierten Quarzfäden mit, und diese werden sich infolgedessen gegenseitig abzustoßen, d. h. sie werden sich in der Mitte bei F voneinander zu entfernen versuchen. Diese Entfernung voneinander wird mittels Mikroskops gemessen und ist ein Maß für die angelegte Spannung. S, S sind zwei Metallstücke, die durch K mit einer Hilfsladung versehen werden können und damit die Empfindlichkeit des Instruments zu ändern gestatten. Na sind zwei kleine Kammern, die mit metallischem Natrium gefüllt werden. Das hat die Eigenschaft, alle Feuchtigkeit, die auf die Messungen ungünstig einwirkt, aus dem Instrument zu entfernen.

Das Blättchenelektrometer stellt die Abbildung 24 dar, zugleich in Verbindung mit einem später zu erwähnenden Instrument, dem Engler-Sievekingschen Fontaktoskop. Der Metallstab l, der durch einen anschraubbaren Knopf aus dem Metallgehäuse E bzw. G herausgeführt werden kann, ist von diesem durch Bernstein isoliert und wird auf die zu messende Spannung geladen. Er trägt zwei feine Stanniolblättchen bb, die dann unter dem Einfluß ihrer elektrischen Ladung sich auseinanderspreizen. Diese Bewegung wird an einer Skala abgelesen und ist dann ein Maß der angelegten Spannung. Na ist ebenfalls eine Natriumtrockeneinrichtung.

Fügen wir gleich die Beschreibung des Fontaktoskops an, das im wesentlichen zur Untersuchung radioaktiver Wässer verwendet wird. Bei diesem Instrument setzt sich der Blättchenträger T in eine Metallstange z fort, die vollständig isoliert in das Innere eines zwei bis zehn Liter fassenden Blechgehäuses H führt. In dieses wird das zu untersuchende Wasser gegossen.

Alle drei Elektrometerarten müssen natürlich vor Benutzung mittels bekannter Spannungen geeicht werden. Wir wollen darauf nicht weiter eingehen. Ist es so geeicht, kann man aus der Drehung der Nadel,

der Entfernung der Quarzfäden voneinander oder der Spreizung der Blättchen die angelegte Spannung berechnen.

Die wichtigste Aufgabe, die man zu lösen hat, ist, abgesehen davon, daß man feststellen muß, ob eine Substanz überhaupt radioaktiv ist, zu prüfen, wie stark radioaktiv sie ist.

Das macht man im wesentlichen nach zwei Methoden, die wir nun beschreiben wollen. Die erste verwendet in der Hauptsache die α-Strahlen des Präparates. Man nimmt dazu einen sogenannten Kondensator, der aus zwei kreisförmigen Platten (I und II) besteht, die fest aufgestellt und voneinander isoliert sind, wie es schematisch in Abb. 25 angedeutet ist. Die eine verbindet man mit dem Elektrometer E, die

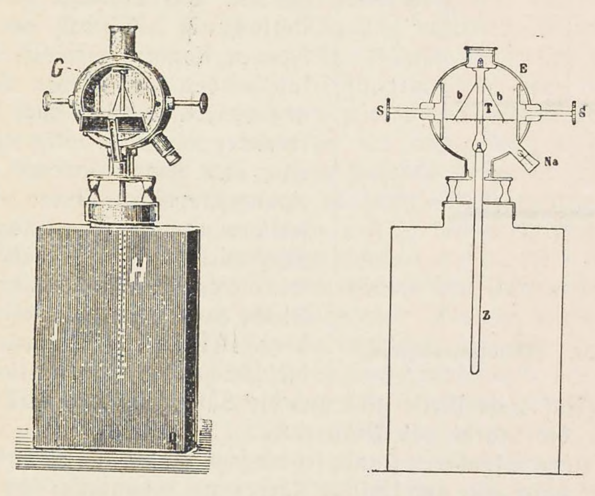


Abb. 24.
Fontaktoskop von Engler und Sieveking mit Blättchenelektrometer.

andere ladet man auf eine bestimmte elektrische Spannung mittels einer elektrischen Batterie H (nehmen wir z. B. an positiv), und auf die untere Platte (II) breitet man in einer dünnen Schicht das zu untersuchende Präparat aus. Dieses sendet jetzt, vorausgesetzt, daß es überhaupt radioaktiv ist, Strahlen aus, welche die sonst elektrisch nicht leitende Luft zwischen den Kondensatorplatten leitend machen, es bilden sich positive und negative Ionen, und zwar um so mehr, je stärker aktiv das Präparat ist. Unter dem Einfluß ihrer elektrischen Eigenkräfte werden die Ionen sich bewegen und zum Teil wieder zu vereinigen suchen. Überdies wird der negative Teil zu der positiv geladenen Kondensatorplatte hingezogen, der positive Teil von ihr weggetrieben und damit auf die andere Platte gestoßen. Diese Bewegung der Ionen kommt dem gleich, als ob ein elektrischer Strom zwischen beiden Platten fließt, der um so stärker sein wird, einmal, je mehr Ionen über-

haupt gebildet werden, und dann, je weniger Jonen sich untereinander vereinigen, d. h. je mehr von den vorhandenen unter dem Einfluß der Spannung nach den Kondensatorplatten getrieben werden. Ist die Spannung so hoch, daß alle ständig neu erzeugten Jonen sofort, ohne untereinander zur Vereinigung zu kommen, auf die Platten getrieben werden, so haben wir den für die Stärke des Präparates charakteristischen stärksten Strom, den Sättigungsstrom, d. h. alle von dem Präparat erzeugten Jonen dienen zur Stromerzeugung, und wenn wir auch die Spannung beliebig erhöhen, wird die Stromstärke zwischen den beiden Platten nicht größer werden. Das Ergebnis eines solchen Versuchs ist also, daß von der geladenen Kondensatorplatte Elektrizität zu der ungeladenen überströmt und diese und damit auch das Elektrometer auflädet. Das beobachten wir und können daraus die Sättigungsstromstärke finden. Wir müssen uns nur überzeugen, daß wir sie auch wirklich erreicht haben, indem wir die angelegte Spannung erhöhen. Bleibt dann die Geschwindigkeit, mit der das Elektrometer aufgeladen wird, die gleiche, so ist sie tatsächlich vorhanden. Auf diese Weise gibt uns die Sättigungsstromstärke ein Urteil über die Stärke des Präparates.

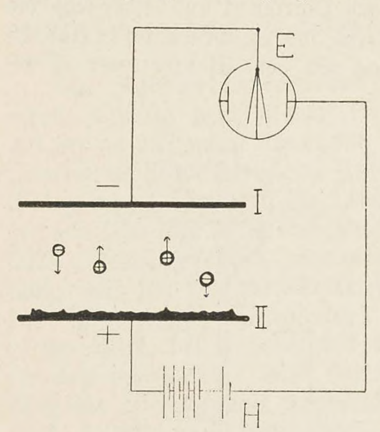


Abb. 25. Aktivitätsmessung.

Auf einen besonderen Punkt sei hingewiesen. Für den Elektrizitätsdurchgang durch feste und flüssige Körper gilt bekanntlich das Ohmsche Gesetz, das wir einfach so ausdrücken können: Haben wir einen elektrischen Widerstand, z. B. einen Draht, einen elektrolytischen Apparat wie in Abb. 1, Seite 8, der einen Widerstand von genau einem Ohm haben möge, und legen wir an seine Enden eine Spannung von genau einem Volt heran, wie sie z. B. eines der bekannten Braunstein-Kohle-Elemente liefert, die zu Klingelleitungen benutzt werden, so fließt durch den Draht ein Strom von der Stärke eines Ampère. Legen wir statt dessen zwei Volt an, so fließen zwei Ampère hindurch, zehn Volt, zehn Ampère usw. Anders ist es bei ionisierten Gasen, wie oben. Haben wir z. B. bei dem obigen Versuch bei 100 Volt den Sättigungsstrom erreicht, so können wir ruhig die Spannung auf 1000 Volt erhöhen: die zum Elektrometer fließende Strommenge wird genau die gleiche bleiben. Also, für ionisierte Gase gilt das Ohmsche Grundgesetz der Elektrizität nicht mehr ohne weiteres. Bei der Elektrolyse, wo die Stromüberführung doch auch nur durch Jonen erfolgt, müßte es dann doch auch nicht gelten, könnte man einwenden. Ein durchaus berechtigter Einwand, der nur aus dem

Grunde nicht zutrifft, weil es praktisch nicht möglich ist, bei der Elektrolyse den Sättigungsstrom zu erreichen. Wir sind von diesem Zustand noch weit entfernt, der größte Teil der Jonen wandert nicht nach den Elektroden, sondern vereinigt sich noch unterwegs. Für Elektrolyte bleibt also das Ohmsche Gesetz noch bestehen. Würde man da die Spannung immer weiter erhöhen, bis man zu einem Sättigungsstrom gelangt, so würde vermutlich die Flüssigkeit durch den Strom so stark erhitzt werden, daß sie sich sofort in Dampf verwandelt.

Diese elektrometrische Anordnung ist ganz ungeheuer empfindlich. Es gelingt ohne Mühe, Radiummengen nachzuweisen, die nur ein Hundertmillionstel eines Milligramm betragen. Würde man ein Milligramm Radium, also eine Menge von Stecknadelkopfgröße, unter alle Einwohner des Deutschen Reiches gleichmäßig verteilen, so würde noch auf jeden genug kommen, um es elektrometrisch nachweisen zu können.

Gehen wir jetzt zur zweiten Messungsmethode über, welche die γ-Strahlen verwendet. Wir nehmen wieder das Elektrometer, z. B. das Blättchenelektrometer, laden es auf und lesen es ab. Dann bringen wir in die Nähe das zu untersuchende Präparat hinter einen Bleischirm, der nur die γ-Strahlen durchläßt. Diese werden die Luft in der ganzen Umgebung ionisieren und so das Elektrometer langsam entladen. Die Entladungsgeschwindigkeit messen wir. Aus dieser können wir Schlüsse auf die Radioaktivität des Präparates ziehen, erfahren darüber aber noch nicht sehr viel. Nehmen wir jedoch an, wir besitzen ein Präparat, dessen Radiumgehalt wir kennen, und wir bestimmen mit diesem die Entladungsgeschwindigkeit des Elektrometers. Nun entfernen wir es, ersetzen es durch das zu untersuchende Präparat und finden, daß es das Elektrometer dreimal so schnell entladet: dann wissen wir, daß sein Radiumgehalt dreimal so groß ist.

Einen Vorteil von dieser Methode werden wir also nur dann haben, wenn wir ein Präparat bekannten Gehalts besitzen. Das ist auch besonders in dem Fall noch von praktischer Wichtigkeit, wenn es sich darum handelt, Radiumpräparate zu Bestrahlungen medizinisch anzuwenden, und, wenn es sich darum handelt, sie in Geld umzuwandeln, sie zu kaufen oder zu verkaufen. Da hierbei ganz ungeheure Summen umgesetzt werden, lag es nahe, ein Normal-Radium-Präparat zu schaffen, das mit bekanntem Radiumgehalt als Internationales Normal dienen sollte; genau so wie das im Internationalen Maß- und Gewichtsbureau in Breteuil bei Paris deponierte Meter das Normal für alle Metermaßstäbe der Welt ist und das dortige Kilogramm für alle Kilogrammstücke.

Auf einer internationalen Konferenz wurde beschlossen, ein solches internationales Standard-Präparat anzufertigen, und das ist auch ausgeführt. Es wurde ein solches von Frau Curie aus dem denkbar reinsten Radiumchlorid hergestellt, das etwa 20 Milligramm enthält. Dieses wurde als internationales Normal erklärt und im Internationalen Maß- und Gewichtsbureau deponiert. Zur Kontrolle wurde

noch ein zweites verfertigt, das im Wiener radiologischen Institut aufbewahrt wird. Selbstverständlich sind beide genau miteinander verglichen. Nach diesen Normal-Präparaten werden nun andere geeicht, und so kann man mittels der oben beschriebenen Meßmethode feststellen, wie stark ihre Radioaktivität ist. Wie schon früher einmal erwähnt, wird damit alles auf die Radiumaktivität bezogen, so daß z. B. ein Präparat aus Mesothorium, das die gleiche γ-Strahlen-Aktivität wie ein Milligramm Radium hat, tatsächlich nur etwa $1/_{300}$ Milligramm Mesothorium enthält.

Jenes Normal-Präparat ist ein etwas eigenartiges Normal. Von den Normalen des Meter und Kilogramm wissen wir es, bzw. nehmen es wenigstens an zu wissen, daß sie ganz unveränderlich sind. Von diesem Radium-Normal wissen wir aber ganz genau, daß es nicht unveränderlich ist, vielmehr, daß nach etwa 1800 Jahren nur noch die Hälfte von ihm vorhanden ist. Glücklicherweise ist das ja aber eine so lange Zeit, daß später einmal sicherlich andere Methoden usw. bekannt sein werden, worüber wir uns jetzt noch nicht den Kopf zu zerbrechen brauchen, überdies wissen wir recht gut, wie Radium sich verändert, können also ohne Mühe an unseren Beobachtungsergebnissen eine kleine Verbesserung anbringen, wenn die Aktivität im Laufe der Jahre langsam nachläßt. Diese Verbesserung ist ja nur recht klein. Wäre das internationale Normal aus Mesothorium hergestellt, so hätte die Herrlichkeit in wenigen Jahrzehnten bereits ein Ende. Das wäre also höchst unzweckmäßig gewesen.

Bei solchen Messungen ist noch eins zu berücksichtigen. Da die radioaktiven Stoffe zerfallen, entstehen sofort neue, die ihrerseits Strahlen aussenden. Das muß bei den Messungen irgendwie berücksichtigt werden. So z. B. wird ein Radiumpräparat ganz andere Aktivitäten aufweisen, je nachdem es frei von Radium C ist oder nicht. Im ersten Fall treten zu seinen Strahlen noch die γ-Strahlen des Radiums C hinzu, usw.

Das sind die wichtigsten Methoden, nach denen der Gehalt fester Körper an aktiven Substanzen gemessen wird. Nicht weniger wichtig ist es aber auch, diesen Gehalt bei Flüssigkeiten, insbesondere den Gehalt an Emanation zu finden.

Dazu benutzt man das schon früher beschriebene Engler-Sievekingsche Fontaktoskop (Abb. 24). Es besteht das ja im wesentlichen aus einem Blechgefäß zur Aufnahme der Flüssigkeit, einem darin hereinragenden Metallstab und einem mit ihm verbundenen Elektrometer. Die emanationshaltige Flüssigkeit wird in das Gefäß gegossen, und dieses dann eine Zeitlang geschüttelt, bis sich die Emanation aus der Flüssigkeit möglichst vollständig entfernt und mit der Luft gemischt hat. Dann setzt man den Stab und das Elektroskop auf, ladet diese beiden und beobachtet, wie infolge der Ionisierung der Luft durch die α-Strahlen der Emanation diese Ladung mehr oder weniger langsam aus dem Elektrometer ausfließt. So mißt man die Stromstärke, die

von dem „Zerstreuungskörper“, dem Stab, nach dem Gefäßmantel überströmt; diese dividiert man durch die Anzahl der Liter der in dem Gefäß enthaltenen Flüssigkeit, und man hat damit die Stromstärke, die ein Liter der emanationshaltigen Flüssigkeit hervorrufen würde. Aus praktischen Gründen multipliziert man diese Zahl mit 1000, und hat dann das, was man allgemein als Mache-Einheit zur Bezeichnung des Emanationsgehaltes von Quellwässern angibt. Liest man z. B., daß die stärkste deutsche Quelle, die Brambacher Wettinquelle 2270 Mache-Einheiten Emanation enthält, so heißt das, daß ein Liter ihres Wassers in dem Engler-Sievekingschen Fontaktoskop einen Stromübergang von 2,270 Stromstärkeeinheiten hervorruft.

Es ist das wohl eine ganz praktische, aber nicht sehr glücklich gewählte Einheit, da sie etwas von der Ausführung des Fontaktoskops abhängt. Neuerdings geht man infolgedessen dazu über, eine andere Einheit einzuführen, die man als „1 Curie“ bezeichnet. Schließt man 1 Gramm Radium emanationsdicht in eine Glasröhre ein, so wird sich in dieser allmählich ein gewisser Gleichgewichtszustand einstellen, derart, daß ebensoviel Emanation aus dem Radium entwickelt wird, wie wieder zerfällt. Diese so im Gleichgewicht mit dem Radium befindliche Emanationsmenge bezeichnet man als 1 Curie; sie beträgt etwa 0,6 Kubikmillimeter, und man kann ansetzen, daß eine Macheeinheit etwa $0{,}4025 \cdot 10^{-9}$ Curie ist. Man ist dann also nicht ohne weiteres von zufälligen Eigenschaften des Fontaktoskops abhängig, sondern gibt allgemein nachprüfbare Zahlen an.

Bedingung dafür ist dann aber auch, daß man seinen Meßapparat, genau wie früher mit einem festen Normalpräparat, mit einer Radiumlösung, eicht. Man stellt sich diese entweder her, indem man eine geeignete Menge eines Radiumsalzes in Wasser löst, oder indem man eine Lösung unbekannten mit einer Normallösung schon bekannten Gehaltes vergleicht. Die Herstellung solcher „Normallösungen“ ist bereits im Gange. Man weiß dann in jedem Fall, welche Mengen Emanation in diesen in bestimmten Zeiten erzeugt werden, nachdem man die Lösung zu Beginn der Versuche durch Auskochen davon befreit hat. So kann man dann unabhängig von allen besonderen Eigentümlichkeiten des benutzten Apparates den Emanationsgehalt von Wässern gut messen.

Auch bei solchen Messungen sind natürlich eine ganze Reihe von Vorsichtsmaßregeln zu beachten; so besonders die, daß die Wässer ohne starkes Schütteln in das Fontaktoskop eingegossen werden müssen, da sonst ein Teil der Emanation entweicht. Um diese sehr wichtige Fehlerquelle zu vermeiden und eine Messung in Ruhe im Laboratorium und nicht an der Quelle selbst ausführen zu können, wird z. B. nach dem Vorschlag von Greinacher so verfahren, daß eine luftleer gemachte, mit einem Hahnverschluß versehene Glasflasche direkt aus der Quelle gefüllt, verschlossen und ins Laboratorium versandt wird. Dort wird sie durch ein Glasrohr unmittelbar mit dem Meßapparat ver-

bunden, und nun alle Emanation durch Auskochen in ihn hineingetrieben. Es geht dann von dieser nichts verloren, abgesehen von dem Teil, der naturgemäß durch Zerfall verschwunden ist und rechnerisch nach der Zeit zwischen Füllung der Flasche und Messung berücksichtigt werden kann.

Auf die Messungsmethoden der Halbwertszeit braucht wohl nicht gesondert eingegangen zu werden. Sie lassen sich selbstverständlich durch Messung der Aktivitäten der einzelnen Stoffe zu verschiedenen Zeiten finden. Sind die Halbwertszeiten sehr groß oder sehr klein, müssen andere Methoden angewendet werden, Vergleichungen mit der Strahlungsfähigkeit anderer Körper, deren Halbwertszeit bereits bekannt ist; es sind das Methoden, die im Grunde genommen darauf beruhen, daß ein Radiostoff um so stärker strahlt, je schneller er zerfällt. Ein genaueres Eingehen darauf würde uns zu weit von dem eigentlichen Thema entfernen.

Die letzte Größe endlich, die erforderlich ist, um die radioaktiven Stoffe zu charakterisieren, ist, wie schon oben erwähnt, ihre **Reichweite**. Diese haben z. B. **Bragg** und **Kleeman** folgendermaßen festgestellt. Wie die Abb. 26 zeigt, blendeten sie durch geeignete Metallstücke von der betreffenden radioaktiven Substanz ein Bündel α-Strahlen aus, das sie auf einen Kondensator (I, II) fallen ließen. Dieser Kondensator bestand nicht aus zwei massiven Metallplatten wie z. B. oben in Abb. 25, sondern aus einer massiven Platte (I) und einem in 1 bis 2 Millimeter Entfernung davon ausgespannten Drahtnetz (II), so daß also ein großer Teil der α-Strahlen, soweit er nicht gerade auf die Drähte des Netzes auftraf, es durchdringen konnte. Das Drahtnetz und die Platte wurden mit einer elektrischen Batterie und dem Elektrometer verbunden. Dann wurde die Entfernung des Kondensators von dem Präparat so lange geändert, bis in ihm keine merkliche Ionisation eintrat. Diese Entfernung war dann die Reichweite.

Abb. 26.
Messung der Reichweite.

VII. Kapitel.

Anwendung radioaktiver Erscheinungen in Geologie und Erdgeschichte.

In den nachfolgenden Zeilen soll nicht auf das geologische Vorkommen des Radiums eingegangen werden, sondern auf seine **Bedeutung in der Geologie, insbesondere der Erdgeschichte.**

Wir haben früher schon erwähnt, daß radioaktive Stoffe die Farben anderer Substanzen merklich verändern können. Eine solche Erscheinung ist auch in der Geologie festgestellt worden, die bis dahin nicht recht verständlich war, bis sie Joly durch diese Eigenschaft des Radiums aufklärte. In manchen Glimmerstücken fand man mikroskopische Mineraleinschlüsse, die um sich herum eine von der Hauptfarbe des Minerals abweichende Färbung des Glimmers veranlaßten. Analog den meteorologischen Erscheinungen der Lichthöfe um Sonne und Mond, wie man sie häufig auch in unseren Gegenden beobachten kann, bezeichnete man diese Färbungen als Halos oder pleochroitische Höfe. Eine gute Erklärung dafür hatte man nicht, bis sich herausstellte, daß diese mikroskopischen Einsprenglinge in der Mitte des Halo radioaktiver Art sind, und so lassen die Erscheinungen sich ungezwungen erklären. Natürlich ist der Radiumgehalt dieser Teilchen sehr gering, so daß es ungeheuer lange Zeit dauert, bis merkliche Färbungen zustande kommen. Immerhin kann man daraus ungefähr schließen, wann etwa diese Gesteine entstanden sein müssen, und man gelangt da zu Altern von mehreren Hunderten von Jahrmillionen.

Wir haben auch früher schon erwähnt, daß bei den Umwandlungen der radioaktiven Stoffe, von den Anfangsgliedern der drei Reihen bis zu den Endgliedern, recht bedeutende Wärmemengen ständig entwickelt werden. Überdies hat man nachweisen können, daß Radiostoffe in sehr großen Mengen überall auf der Erde vorkommen. Leider trotzdem überall nur in winzigen Quantitäten, so daß die Ausbeutung der betreffenden Gesteine praktisch erfolglos wäre. Trotzdem ist die von allen diesen Mengen entwickelte Wärme für den Wärmehaushalt der Erde nicht ohne Bedeutung. Man hat nachgerechnet, daß in jedem Kubikmeter Erdsubstanz durchschnittlich nur wenige Zehntausendstel Milligramm Radium vorhanden sein müßten, um jeden Wärmeverlust der Erde durch Ausstrahlung in den Weltenraum auszugleichen, und damit ihre Temperatur unverändert zu erhalten.

Im Durchschnitt enthalten die Gesteine der Erdrinde aber viel mehr Radium, so daß wir schließen müssen, daß es im Erdinnern nicht so reichlich vorhanden sein kann, oder infolge der ungeheuer hohen Temperatur des Innern sich anders verhält wie bei den uns zur Verfügung stehenden künstlich herstellbaren Temperaturen.

Auch auf der Sonne dürfte mit Rücksicht darauf, daß Helium in ihr in großen Mengen vorhanden ist, das Vorkommen von Radium nicht unwahrscheinlich sein. Doch sind das natürlich nur Hypothesen, und mit Rücksicht auf ihre hohe Temperatur, die an ihrer Oberfläche schon etwa 6000° beträgt, können wir nicht mit Sicherheit aussagen, wie sich das Radium, falls es dort vorhanden ist, wirklich verhält.

Jedenfalls können wir das wohl mit Zuverlässigkeit als festgestellt ansehen, daß die große Verbreitung radioaktiver Stoffe für den gesamten Wärmehaushalt des Weltalls nicht ohne Bedeutung ist.

Im Anschluß an radioaktive Umwandlungen ist aber eine andere

interessante Frage durch die Arbeiten von Strutt, Holmes und anderen genauer untersucht, nämlich die Frage nach dem Alter der Erde. Wir haben früher schon gehört, daß die Radiummenge in jeder Tonne Uran genau die gleiche ist, nämlich etwa ein drittel Gramm. Desgleichen ist das Verhältnis der Bleimenge als dem Endprodukt des Uranzerfalles zum Uran in gewisser Weise unveränderlich, nämlich so, daß es bei allen den Mineralien das gleiche ist, die geologisch zu gleicher Zeit entstanden sind. Man geht also derart vor, daß man bei verschiedenen Mineralien, die geologisch verschiedenen Epochen angehören, den Uran- und den Bleigehalt bestimmt. Das Verhältnis beider ist charakteristisch für das Alter der geologischen Epoche, aus der die Gesteine stammen. Selbstverständlich sind nicht alle Uranmineralien dafür brauchbar. Einmal dürfen sie natürlich nicht aus anderen Gründen Blei enthalten, und dann dürfen sie ihren Bleigehalt nicht aus chemischen Gründen ändern. Es hat sich indessen eine Anzahl solcher Gesteine, insbesondere Zirkongesteine, finden lassen.

Auch in einer anderen Richtung kann man vorgehen; nämlich durch Messung der in einzelnen Gesteinen vorhandenen Heliummengen. Wir wissen einmal, daß das Helium allmählich aus dem Uran entsteht, in Form von α-Strahlen, und daß jedes Gramm Uran im Jahre $1,88 \cdot 10^{-11}$ Gramm Helium erzeugt. Das können wir aus bekannten Zahlen über die Heliumentwicklung von Radium berechnen. Wenn wir also den Heliumgehalt eines Urangesteines kennen, so sind wir in der Lage, auf seine Entstehungszeit zu schließen. Selbstverständlich müssen wir auch seinen Urangehalt kennen. Notwendigerweise sind auch hier Gesteine auszuwählen, die alles entstandene Helium festhalten. Wir haben dabei eine verhältnismäßig einfache Kontrolle in dem Bleigehalt der Gesteine. Es läßt sich ja leicht berechnen, wie groß die Heliummenge im Vergleich zu der Bleimenge sein muß, die jedes Uranmineral notwendig enthalten muß. Ist das Verhältnis beider nach dem Ergebnis der Versuche nicht das so berechnete, so weiß man, daß die weiteren Arbeiten an diesen Mineralien keine sehr zuverlässigen Ergebnisse liefern werden. Jedenfalls kennt man aber eine ganze Reihe von Mineralien, welche das Helium gut festhalten, die also zu Altersbestimmungen zu brauchen sind. Es handelt sich dabei ebenfalls um Zirkongesteine, auch die Pechblende ist brauchbar, usw.

So läßt sich aus ganz verschiedenartigen Messungen das geologische Alter einzelner Erdschichten angenähert berechnen, selbstverständlich nur von der Zeit an, wo sie als feste Gesteine zu existieren begannen. Und da ergeben sich recht interessante Zahlen. Als Mindestwert für das Alter der Erde wurden 700 Millionen Jahre berechnet. Als Höchstwert etwa 1000 Millionen. Für die Pechblende als ein jüngeres Gestein ergaben sich etwa 300 Millionen Jahre.

Es ist natürlich äußerst schwer, sich von dieser ungeheuer langen Zeit eine Vorstellung zu machen. Nehmen wir einmal die Zeit, von der wir historische Überlieferungen irgendwelcher Art haben, also aus

den ältesten chinesischen Reichen und der Zeit der Babylonier und Ägypter bis zur Jetztzeit. Wir können diese Epoche ganz rund gerechnet nur zu etwa 10000 Jahren ansetzen, also etwa von 8000 vor Christi Geburt an. Stellen wir uns eine Zeit von nur hundert Millionen Jahren (10^8 Jahren) durch die Länge eines Meters vor, so entfallen auf jene 10000 Jahre (10^4 Jahre) nur ein Zehntel eines Millimeter, also eine Länge, die ungefähr durch die Dicke eines Haares oder eines Papierblattes dargestellt wird! Ein ganz junges Gestein der Quartärperiode aus der Eifel hat nach diesen Berechnungen nur ein Alter von etwa einer Million Jahren. Das Alter der ältesten geologischen Epoche, die man als Algonkium oder Präkambrium bezeichnet, der Erdschicht, die sich unmittelbar über die kristallinischen Urschiefer des Erdkörpers auflagert, und welche diejenige Epoche der Erdgeschichte umfaßt, die zum erstenmal Spuren organischen Lebens zeigt, schätzt man nach derartigen Rechnungen und Untersuchungen auf etwa 300 Millionen Jahre.

Einen allzu großen Grad von Genauigkeit haben alle diese Zahlen natürlich nicht. Sie können und sollen auch nur Vorstellungen über das ungefähre Alter der Erde geben. Sie haben den Vorzug, daß sie mit Schätzungen auf rein geologischer Grundlage recht gut zusammenstimmen, was man von sonstigen Methoden der Bestimmung des Erdalters nicht immer sagen kann.

So hat z. B. Sir William Thomson das Alter der Erde aus der Temperaturverteilung in ihrem Innern berechnet und ist dabei zu einem sicherlich zu kleinen Erdalter von etwa 33 bis 100 Millionen Jahren gelangt. Andere kommen aus ähnlichen Annahmen zu etwa 60 Millionen Jahren.

Sehr interessant ist auch die Methode, die auf dem Natriumgehalt der Meere beruht. Man berechnet den tatsächlichen Gehalt der Meere an Natrium im Durchschnitt und ebenso den der Flüsse, der ihm jährlich zugeführt wird. So kann man auch auf das Erdalter schließen und gelangt zu Werten von etwa 100 Millionen Jahren.

Alle die Methoden, die auf der Radioaktivität beruhen, liefern größere Werte. Welche nun die richtigen sind, muß dahingestellt bleiben. Es sind jedenfalls noch immer recht beträchtliche Unterschiede in den Angaben der einzelnen Autoren vorhanden, die nach den Methoden und Annahmen, die sie gemacht haben, zwischen 30 und 1600 Millionen Jahren schwanken. Ob sich das wahre Alter der Erde überhaupt mit Sicherheit wird feststellen lassen, die Zeit, in der sie etwa ihre jetzige Gestalt annahm? Wer weiß es? Jetzt kennen wir nur mit sehr großer Annäherung ihr Alter, ohne mit Sicherheit sagen zu können, aus welchem Grunde die verschiedenen Methoden sich in ihren Ergebnissen so abweichend zeigen.

VIII. Kapitel.

Zählung und Sichtbarmachung von Atomen.

Fassen wir nun einmal die ganz allgemeinen Ergebnisse des bisher besprochenen zusammen: Wir haben eine Anzahl Substanzen kennen gelernt, die nicht allzu selten in der Natur vorkommen, die in ihren Eigenschaften von den bisher bekannten merklich abweichen. Der wichtigste Unterschied ist der, daß sie in ganz bestimmten Gesetzen, die wir ebenfalls kennen gelernt haben, ineinander übergehen. Dieser Übergang erfolgt unter Aussendung von Strahlen. Diese Strahlen können wir untersuchen, und wir stellen dabei fest, daß es sich um drei grundverschiedene Arten dabei handelt. Einmal Strahlen, die aus schnell fortgeschleuderten Partikelchen materieller Stoffe, und zwar aus elektrisch geladenen Heliumatomen, sodann Strahlen, die ebenfalls aus schnell fortgeschleuderten Partikelchen bestehen, die jetzt aber nicht mehr materiell in dem gewöhnlichen Sinne des Wortes, sondern Atome Elektrizität sind, und die man als Elektronen bezeichnet; endlich eine dritte Art von Strahlen, die in einer Wellenbewegung des Lichtäthers besteht, die also grundsätzlich von den Lichtstrahlen nicht verschieden sind.

Durch das Aussenden dieser Strahlen, die unter dem Einfluß des Zerfalls der einzelnen Atome der oben erwähnten „radioaktiven" Stoffe und der dabei freiwerdenden großen Energiemengen erfolgen, werden die Atome merklich geändert. Einmal verlieren sie unmittelbar materielle Masse, die wir nachher als Heliumatome nachweisen, ein andermal verlieren sie elektrische Masse, d. h. Elektronen, die ebenfalls zu jedem Atom notwendig gehören. Die dritte Art der Strahlen wird vermutlich durch die Bewegung der ausgeschleuderten Elektronen und das Aufprallen der Elektronen auf die umliegenden Atome erzeugt, ist aber anscheinend sonst mit Änderungen von und in den Atomen nicht verbunden.

Die wichtigsten Aufschlüsse, die uns die Entdeckung der radioaktiven Stoffe gegeben hat, liegen demnach nicht in den praktischen Anwendungen in Biologie, Geologie, Medizin, auch nicht auf chemischem Gebiet, wo wir jetzt auch mit nicht mehr stabilen Elementen zu tun haben, sondern, ohne behaupten zu wollen, daß jenes ganz unwichtig ist, in der Aufdeckung von Vorgängen am und im Atom selbst.

Die radioaktiven Stoffe lehren uns nicht mehr wie bisher mit Atomgruppen, in denen ungezählte Mengen von Atomen vorhanden sind, zu arbeiten, sondern mit einzelnen Atomen. Die einzelnen Atome selbst treten in Erscheinung und, mit Rücksicht auf die nicht unbedeutenden Kräfte, die schon bei dem Zerfall eines Atoms oder dem Aufprallen eines fortgeschleuderten Atoms auf ein Hindernis merkbar werden, geben uns Mittel und Wege an, die einzelnen Atome selbst wahrnehmbar zu machen. Die einzelnen Atome zu sehen, vermögen

wir nicht. Dazu reichen unsere Augen, auch mit Verwendung eines stark vergrößernden Mikroskops nicht aus. Aus Betrachtungen über die Wellenbewegung des Lichtes schloß Abbe, daß wir niemals in der Lage sein werden, auch wenn wir die Vergrößerung der Mikroskope immer weiter treiben, Körperchen, die kleiner sind als etwa ein Fünftausendstel eines Millimeters, zu sehen, d. h. also, Körperchen, die kleinere Abmessungen haben als die Lichtwellen, die uns die Lichtwahrnehmung vermitteln. Und die Größe der Atome ist noch viel geringer. Man kann sie ja mit einiger Annäherung berechnen. Wir erwähnten schon früher, auf Seite 29, die Loschmidtsche Zahl, die uns angibt, wieviel Atome in einem Kubikzentimeter eines Gases enthalten sind. Komprimieren wir nun eine bestimmte Gasmenge, von der wir also wissen, wieviel Atome sie enthält, so stark, daß das Gas verflüssigt wird, so wissen wir, daß genau ebenso viele Atome in der Flüssigkeit vorhanden sind, die durch die Kompression sich gebildet hat, wie vorher in dem Gas, und da eine solche Flüssigkeit nicht weiter zusammengedrückt werden kann, wissen wir auch, daß in ihr die Atome so dicht wie möglich gelagert sind; wir können daraus also den Raum, den ein Atom einnimmt, angenähert berechnen und finden z. B. für Luft eine Molekelgröße, wenn wir annehmen, daß die Luftmolekel Kugelgestalt haben, von etwa $3 \cdot 10^{-7}$ mm Durchmesser. Wir müßten also schon ganz bedeutende Mengen von Molekeln zusammenfügen, um sie im Mikroskop sichtbar zu machen.

Aber wie schon oben gesagt, können wir zwar die einzelnen Atome nicht sehen, wohl aber die Wirkungen dieser. Damit haben wir die interessante Möglichkeit festzustellen, wie viele Atome Helium z. B. von einem radioaktiven Körper bekannten Gewichts in einer bestimmten Zeit ausgeschleudert werden. Man bezeichnet solche Methoden als Zählmethoden.

In gewisser Weise ist ja die Thomsonsche Methode, die wir auf Seite 24 ausführlich besprochen haben, auch schon eine solche Zählmethode, als es mit ihr gelang, Ladung und Größe der einzelnen Nebelbläschen festzustellen. Indessen traten dort nicht die einzelnen Atome selbständig in Erscheinung.

Wir haben oben schon das Spinthariskop von Crookes erwähnt, jenen kleinen Apparat, in dem von einem radioaktiven Präparat α-Strahlen ausgesandt werden, die auf einen Zinksulfid- oder einen sonstigen Leuchtschirm auftreffen und diesen im Moment des Aufprallens zu hellem punktförmigem Leuchten, Szintillieren anregen. So ist es z. B. möglich, ohne weiteres die in einer gewissen Zeit ausgesandten α-Partikelchen, soweit sie auf den Leuchtschirm auftreffen, zu zählen. Indessen ist diese Methode nicht so ganz einfach in ihrer Ausführung, und Rutherford und Geiger haben sie merklich vervollkommnet. Sie stellten sich ein stark luftverdünntes Gefäß her, das an seinem Boden die radioaktive Substanz enthielt. Deren Strahlen fielen nicht auf einen mit Zinksulfid bestrichenen Schirm,

sondern direkt auf ein dünnes Kristallplättchen aus Zinksulfid, Willemit oder Diamant. Sonst ist dessen Wirksamkeit genau die gleiche wie die eines Zinksulfidschirmes. Da jene durchsichtig sind, wurde ein sehr stark vergrößerndes Mikroskop von außen darauf gerichtet. Dann wurde durch Blenden aus Metall die Zahl der auftreffenden α-Partikelchen so weit heruntergesetzt, daß etwa nur alle zwei Sekunden eines auf die Beobachtungsstelle fiel. So konnten in Ruhe die auftreffenden Teilchen gezählt werden, und man konnte berechnen, wie viele z. B. ein Gramm Radium in einer Sekunde nicht nur in dieser Richtung, sondern nach allen Seiten abgibt. Man nimmt jetzt an, daß ein Gramm emanationsfreien Radiums $34 \cdot 10^9$ Teilchen in der Sekunde aussendet, also 34 Milliarden.

Auch noch auf eine andere Art haben Rutherford und Geiger diese Zahl bestimmt. Sie ließen ebenfalls aus einem luftleer gepumpten Gefäß (A) durch geeignete Blenden eine Anzahl α-Strahlen

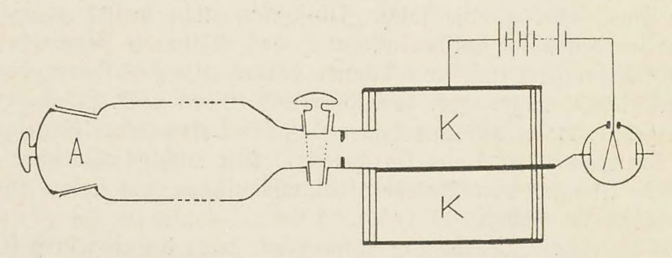


Abb. 27. Zählmethode für α-Teilchen von Rutherford und Geiger.

austreten. Diese ließen sie aber nun nicht mehr auf einen Leuchtschirm auftreffen, sondern zwischen den Platten eines elektrischen Kondensators (K) hindurchlaufen, wie es die Abb. 27, welche die Versuchsanordnung schematisch darstellt, angibt. Die eine Platte dieses Kondensators ist negativ elektrisch geladen und mit der Nadel eines geeigneten Elektrometers verbunden. Wenn nun ein Teilchen durch die Blende hindurchgeschleudert wird, so gerät es in das Bereich der geladenen Kondensatorplatte und wird von ihr, da es selbst positiv elektrisch ist, angezogen. Der Erfolg wird dann sein, daß durch Vereinigung der positiven Elektrizität des Teilchens und der negativen der Kondensatorplatte und der Nadel des Elektrometers ein kleiner Teil dieser Elektrizität neutralisiert wird, er verschwindet gewissermaßen, was zur Folge hat, daß die Elektrometernadel im gleichen Augenblick sich ein wenig bewegt. Das wird jedesmal eintreten, sobald ein Teilchen durch die Blende hindurchfliegt. Das kann man stets durch die ruckweise Bewegung der Elektrometernadel feststellen. So kann man die Zahl der Teilchen bestimmen, die z. B. in einer Stunde die Blende passieren, und dann aus den Abmessungen des Apparates wie auch früher bei der Anordnung mittels Mikroskops berechnen, wieviel Teilchen nach allen Seiten ausgeschleudert werden.

Noch eine dritte Methode sei erwähnt, die von Regener ausgebildet ist und die schematisch durch die Abb. 28 wiedergegeben wird. Er zerstäubte Öl in winzig feine Tröpfchen und ließ diese zunächst von O her zwischen den Platten eines Kondensators hindurchstreichen, von denen eine Platte positiv, die andere negativ geladen war. Dabei wurden, und das war der Zweck der Anordnung, alle etwa elektrisch geladenen Öltröpfchen durch die Anziehungskraft der Kondensatorplatten beseitigt. Sodann gelangte der Ölnebel an dem zu untersuchenden radioaktiven Präparat (Ra) vorbei, wobei dann die α-Partikelchen oder Elektronen sich an die einzelnen Tröpfchen anlagerten, natürlich nicht an alle, sondern nur an so viele, wie der Zahl der Partikelchen bzw. Elektronen entsprach. Weiter in der Richtung des Ölstromes befand sich dann eine Röhre L, durch die ein Luftstrom in entgegengesetzter Richtung geblasen wurde, so daß der feine Ölnebel zurückwich, und in der

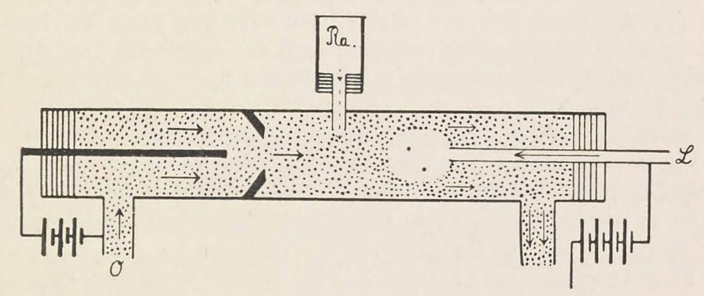


Abb. 28. Zählmethode für α- und β-Teilchen von Regener.

Nähe der Mündung der Röhre ein nebelfreier Raum entstand. Nun wurde die Röhre negativ elektrisch geladen; in dem gleichen Augenblick wurden die positiv geladenen Nebeltröpfchen, also die α-Partikelchen mit den zugehörigen Tröpfchen, nicht mehr von der Röhre fortgestoßen, sondern zu ihr hingezogen und passierten den nebelfreien Raum; entsprechend bei positiv geladener Röhre wurden die Öltröpfchen mit angelagerten Elektronen in diesen Raum gezogen. Auf ihn wurde dann ein Mikroskop gerichtet, und der ganze Raum intensiv beleuchtet. Ein Teil der Tröpfchen war sicherlich so groß, daß er unmittelbar unter dem Mikroskop sichtbar war, ein anderer Teil war aber auch sicherlich unterhalb der mikroskopischen Sichtbarkeitsgrenze. Das hat aber hier wenig zu bedeuten. Denn man will ja nicht die Form der Tröpfchen studieren, sondern ihre Anzahl, und wenn man ein solches „ultramikroskopisches“ Teilchen, wie man es bezeichnet, beleuchtet und zwar möglichst hell, so zeigt es seine Anwesenheit unter dem Mikroskop auch noch durch einen Lichtfleck. Man sieht dann also unter dem Mikroskop einen mehr oder weniger schnell sich bewegenden Lichtpunkt, ohne etwas über seine Gestalt wahrnehmen zu können. Es ist das die Methode der Ultramikroskopie, die noch gestattet, kleine

Teilchen wahrnehmbar zu machen, deren Größe außerhalb der Leistungsgrenze der Mikroskope liegt, wie sie oben erwähnt ist.

Ähnliches kann man so häufig beobachten, wenn ein Sonnenstrahl in ein verdunkeltes Zimmer fällt. Man sieht dann im Sonnenschein die stets in der Luft vorhandenen Staubteilchen hell aufleuchten, so daß man sie einzeln wahrnehmen zu können glaubt; trotzdem kann man sie im sonst hell erleuchteten Zimmer nie in dieser Art beobachten. Wichtig ist eben dabei die intensive einseitige Beleuchtung. In einer ähnlichen Weise hat auch Millikan die elektrischen Ladungen solcher einzelner Tröpfchen messen können, indem er ihre Bewegungen unter dem Einfluß geladener Kondensatorplatten studierte.

Jene oben beschriebenen Methoden gestatten nun, teils die Anzahl der ausgesandten α-Partikelchen eines Radiumpräparates zu zählen, wie z. B. die Methoden der Szintillation oder die Kondensatormethoden, teils, wie die Kondensatormethoden, auch die der β-Teilchen oder Elektronen. Bei den elektrischen Methoden ist es nebenher noch verhältnismäßig leicht möglich, auch die Ladungen der einzelnen Teilchen mitzubestimmen, um so ihre Größe zu berechnen (vgl. weiter unten S. 84).

Jedes α-Teilchen führt eine Ladung — positiver — Elektrizität von $31 . 10^{-20}$ Coulomb mit sich, oder, wie man es besser und richtiger ausdrückt, jedes Heliumpartikelchen der α-Strahlen hat zwei Elektronen zu wenig; fügt man zu jedem zwei Elektronen hinzu, würde es uns elektrisch als neutral erscheinen. (Man stoße sich nicht daran, daß 31 nicht genau das doppelte von 15 ist, wie es nach obengesagtem (S. 26) sein müßte; die beiden Zahlen sind aus Zweckmäßigkeitsgründen etwas abgerundet gegeben.) Wie es zu erklären ist, daß die Heliumpartikelchen gerade zwei Elektronen zu wenig haben, soll uns nicht weiter beschäftigen. Weil aber diese Tatsache nun einmal feststeht, findet man häufiger diese Strahlen als 2α-Strahlen bezeichnet. Es dürfte nützlich sein darauf hinzuweisen, daß es genau die gleiche Elementarladung ist, jene von $15 \cdot 10^{-20}$ Coulomb, die man auch als Elementarladung bei der Elektrolyse der Salze usw. gefunden hat. Es ist das eben jenes elektrische Elementarquantum, das als kleinste unteilbare Elektrizitätsmenge allein vorkommt, die man als Elektron bezeichnet. Sie ist negativer elektrischer Art, positive Elektronen sind niemals bisher irgendwo beobachtet worden. Positive Elektrizität zeigt sich nach der jetzigen Auffassung immer nur so, daß die Anzahl der normal mit den einzelnen Atomen verbundenen Elektronen aus irgendeinem Grunde, z. B. durch das Aufprallen eines α- oder β-Strahles, irgendwie verringert wird. Bei den α-Partikelchen fehlen also, wie schon oben erwähnt, zwei Elektronen.

Es dürfte nun von Interesse sein, hier auf einen der merkwürdigsten Zusammenhänge der Radioaktivität mit einem anscheinend ganz fern liegenden Gebiet der Physik hinzuweisen.

Wir wissen, daß Radium langsam zerfällt, indem es α-Partikelchen,

also Heliumatome absondert, und die Emanation übrigbleibt, die ihrerseits wieder in sehr kurzer Zeit in feste Körper, wiederum unter Abgabe von Helium, zerfällt. Es ist nun rein experimentell möglich, zu messen, welche Heliummenge beim Zerfall von z. B. 1 Gramm Radium in einer Stunde frei wird. Das so entwickelte Helium können wir in geeigneten Apparaten auffangen und messen. Dewar z. B. fand, daß jedes Gramm Radium in 24 Stunden 0,46 Kubikmillimeter Helium entwickelt.

Nun haben wir oben gesehen, daß wir bei den radioaktiven Stoffen die ausgesandten α-Teilchen, also die einzelnen Heliumatome, unmittelbar wahrnehmen und zählen können. Mit andern Worten, wir können die einzelnen Atome des entwickelten Heliums zählen, oder weiter, wir kennen danach also die Anzahl der Atome in dieser Heliummenge. Oben haben wir schon gesagt, daß wir durch derartige Zählmethoden festgestellt haben, daß jedes Gramm Radium $34 \cdot 10^9$ Teilchen in einer Sekunde aussendet. Und noch weiter oben, bei der Besprechung der Zerfallsreihe des Radium, fanden wir, daß es vier Heliumatome abgibt, bis es zu dem langlebigen Endprodukte gelangt. Es entstehen also in einer Sekunde aus einem Gramm Radium $4 \cdot 34 \cdot 10^9$ Heliumatome. Oben haben wir als entwickelte Heliummenge in 24 Stunden 0,46 Kubikmillimeter oder in einer Sekunde $\frac{0,46}{24 \cdot 60 \cdot 60}$ Kubikmillimeter $= 0,0000053$ Kubikmillimeter $= 53 \cdot 10^{-10}$ Kubikzentimeter gefunden. Daraus können wir schließen, daß die Anzahl der Atome in einem Kubikzentimeter $\frac{4 \cdot 34 \cdot 10^9}{53 \cdot 10^{-10}}$ ist; oder wenn wir das berechnen, $\frac{136}{53}\, 10^{19}$, oder $2,6 \cdot 10^{19}$. Das ist also die Anzahl der Atome, die sich in einem Kubikzentimeter Helium befinden.

Nun wollen wir uns in das Gedächtnis zurückrufen, was wir an früherer Stelle über die Gase im allgemeinen gefunden haben. Wir haben dort das allgemeine Gesetz, das Avogadrosche, aufgestellt, daß in gleichen Mengen verschiedener Gase stets, gleiche äußere Bedingungen vorausgesetzt, die gleiche Anzahl Atome vorhanden ist. Wenn wir diese Anzahl also bei einem Gase kennen, ist sie uns auch für jedes andere bekannt.

Weiter suchten wir uns die Vorgänge in einer abgeschlossenen Gasmenge klarzumachen unter der Annahme, daß die einzelnen Gasatome ungeordnete Bewegungen schwingender Art ausführten, so daß alle Gasatome in unregelmäßiger Bewegung sind. Wir konnten aus einfachen Versuchen berechnen, wie lang im Durchschnitt alle diese Wege sind, wir konnten die „mittlere Weglänge“ der Gasatome berechnen, und wir stellten weitere Versuche an, wenn zwei Gase sich durch Diffusion mischen, und welchen Raum das Gas einnimmt, wenn es verflüssigt wird. Die Zahlenergebnisse derartiger Versuche ge-

nügten uns, auf Grund jener einfachen Hypothese zu berechnen, welche Anzahl Atome in einem Kubikzentimeter jedes Gases enthalten ist. Wir fanden dort für diese Größe eine Zahl $2{,}6 \cdot 10^{19}$. Wir bezeichneten sie als die Loschmidtsche Zahl.

Nun werden wir zu unserer Überraschung merken, daß das ganz genau die gleiche Zahl ist, die wir hier auf einem ganz anderen Wege erhalten haben. Es ist das eine Tatsache von ganz besonderer Wichtigkeit, die in ähnlicher Weise sich kaum in anderen Gebieten der Naturwissenschaft wiederfindet. Wir haben hier zwei Gebiete vereinigt, die sonst nichts miteinander zu tun haben: die Lehre von den Gasen und die Radioaktivität. Für beide sind zur Erklärung und Zusammenfassung ihrer experimentell gefundenen Ergebnisse eine Anzahl Theorien aufgestellt, bei den Gasen über die Bewegung der Gasmolekel, bei der Radioaktivität über den Zerfall der radioaktiven Stoffe usw. Die Theorien der beiden Einzelgebiete haben nichts miteinander zu tun, sie werden nur in Übereinstimmung mit der Erfahrung befunden und gestatten uns, die beiden Gebiete einheitlich zu behandeln. Nun findet sich ein Punkt, wo jene fast zufällig sich berühren, und da ergeben beide genaue Übereinstimmung. Ein äußerst wertvoller Prüfstein für sie, wie er besser gar nicht gefunden werden könnte, der nur den Schluß zuläßt, daß wir uns mit beiden auf richtigem Wege befinden.

Wir wollen nach dieser kleinen Abschweifung nun wieder zu unserem Ausgangspunkt, den Methoden zur Zählung der α- und β-Teilchen zurückkehren. Wir haben dort im wesentlichen zwei Methoden kennen gelernt, die Methode mittels der Szintillation und mittels Kondensators. Es ist dort gesagt, daß diese Methoden auch dazu dienen können, die Elementarladung zu bestimmen. Wir haben auch dabei auseinandergesetzt, wie man das macht. Aber da wird wohl manchem schon aufgefallen sein, daß das nicht so einfach sein kann, wie es dort geschildert ist. Wir sahen, daß das elektrische Elementarquantum eine ganz kleine Größe ist; wenn wir einen elektrischen Kondensator geladen haben, und auf eine seiner Platten fällt ein α-Partikelchen, so wird diese wohl seine Ladung ändern, aber nur so wenig, daß wir es mit unseren Meßmitteln nicht wahrnehmen können. Überdies muß man beachten, daß jedes ausgeschleuderte Partikelchen nicht allein für sich zur Wirkung kommt; denn wir haben schon vielfach gesagt, daß die α-Strahlen die Luft ionisieren. Jedes α-Partikelchen trifft auf seinem Wege eine große Anzahl Luftmolekel, reißt hier ein Elektron weg, das sich dort wieder anlegt, kurz wir werden, sowie α-Partikelchen einen Luftraum durchströmen, stets nicht mehr elektrisch neutrale Luftmolekel vor uns haben, sondern positive und negative Ionen. Und diese werden selbstverständlich genau so wie die α-Partikelchen die Ladungen der Kondensatorplatten beeinflussen.

Das Ergebnis bei solchen elektrischen Beobachtungen wird demnach sein, daß man, statt der Wirkung eines einzelnen α-Partikelchen,

also, wie oben gesagt, zweier Elementarladungen, die vereinigte Wirkung von zwei Elementarladungen und den vielen tausend Elementarladungen der erzeugten Ionen merkt. So ist es also nicht möglich, die Größe der Elementarladung gesondert zu bestimmen. Die oben geschilderte vereinigte Wirkung ist indessen schon recht gut merkbar.

Die Größe der Elementarladung ist ja durch die Thomsonschen und die das gleiche ergebenden Millikanschen Versuche bestimmt. Man kann sich auch vorstellen, daß man sie mittels der Szintillationsmethode feststellen kann. Mit dieser kann man ja ohne größere Schwierigkeit zählen, wieviel α-Teilchen ein Präparat in einer gewissen Zeit aussendet. Jedes ausgesandte α-Teilchen führt aber nun eine Ladung von zwei Elementarquanten aus dem Radiumpräparat fort, und die Folge davon wird sein, daß sich dieses selbst entgegengesetzt elektrisch, also negativ auflädet, und zwar für jedes positive Elementarquantum, das es verläßt, um den gleichen Elektronenbetrag negativ. Diese Gesamtladung, die ein solches Radiumpräparat in einer bestimmten Zeit allmählich erhält, kann man natürlich ohne besondere Mühe messen, da sie selbstverständlich bald merkbare Werte annimmt, und da man die in der gleichen Zeit ausgesandten Elementarquantenzahl kennt, kann man durch eine einfache Division die Ladung eines einzelnen Teilchens berechnen. Man kommt da, was wohl nicht besonders betont zu werden braucht, zu dem obigen Wert, der überdies der gleiche ist, wie er bei den elektrolytischen Vorgängen auftritt.

Ein interessantes Nebenergebnis läßt sich aber dann aus den Kondensatormessungen ableiten. Wir können aus der Größe der Elektrometerausschläge berechnen, eine wie große Anzahl Ionen jedes α-Teilchen auf seinem Wege erzeugt. Wir kennen nämlich aus der Größe des Ausschlages die gesamte Ladung, die ein α-Teilchen und die von ihm erzeugten Ionen dem Kondensator zuführen, und wir kennen auch die Ladung jedes einzelnen Ions, können daraus also ihre Gesamtzahl berechnen.

Man wird immer annehmen, daß es sich da um ungeheuer große Zahlen handelt. Das ist durchaus nicht der Fall; man fand vielmehr, daß ein α-Teilchen auf jedem Zentimeter seines Weges nur etwa mehrere Zehntausend Ionen erzeugt. Da die Reichweite aller α-Strahlen einige Zentimeter nicht überschreitet, sind es also insgesamt nicht mehr wie einige Hunderttausend, so z. B. bei Radium selbst, wie Geiger gefunden hat, bei 3,3 Zentimeter Reichweite 153000, bei der Emanation mit 4,2 Zentimetern Reichweite 174000 und bei dem Radium C mit 6,94 Zentimetern Reichweite 232000. Nebenher sei noch erwähnt, ohne genauer darauf einzugehen, daß man mit Hilfe der schon mehrfach erwähnten Gasgesetze ohne besondere Mühe berechnen kann, mit wie vielen Luftmolekeln ein α-Teilchen auf seiner Bahn durchschnittlich zusammenstoßen wird. Diese Berechnung ergibt, daß es in Zentimetern höchstens etwa 70000 sein werden, was mit den wirklich gefundenen Zahlen recht brauchbar zu-

sammenstimmt, besonders wenn man dabei berücksichtigt, daß das naturgemäß nur die Höchstzahl der ionisierten Molekel sein kann.

Zum Schluß dieses Abschnittes wollen wir dann noch auf eine sehr interessante Experimentaluntersuchung von Wilson eingehen. Ihm ist es nämlich gelungen die Bahnen der Strahlen radioaktiver Stoffe unmittelbar zu photographieren. Man sieht dann nicht nur die Wirkung jedes einzelnen Strahles momentan, wie beim Aufblitzen des Zinksulfids oder beim Zucken der Elektrometernadel, sondern man sieht unmittelbar den Weg, den der Strahl zurückgelegt hat.

Er ging so vor. Früher haben wir schon erfahren, daß bei Luft, die mit Wasserdampf übersättigt ist, eine Kondensation des Wasser-

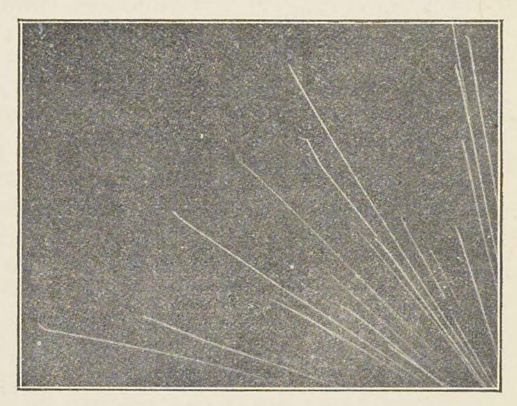


Abb. 29. Wilsonsche Aufnahme von α-Strahlen eines Radiumpräparates.

dampfs zuerst an Staubteilchen oder Jonen eintritt. An dieser Stelle bildet sich dann ein Nebelbläschen. Das ist bereits lange bekannt und von R. v. Helmholtz, dem Sohn des berühmten Herm. v. Helmholtz, festgestellt. Wilson hatte diese Erscheinung schon früher benutzt und dabei gefunden, daß positive und negative Jonen sich dabei nicht ganz gleichartig verhalten. Wenn er mit Wasserdampf gesättigte Luft benutzt und den ihr zur Verfügung stehenden Raum vergrößert, ihr also sich auszudehnen gestattet, so tritt bei einer Vergrößerung des ihr gebotenen Raumes um $^1/_4$ oder einer Ausdehnung auf 1,25 eine Kondensation von Wasser nur an den negativen Jonen ein, bei einer Ausdehnung auf 1,31 auch an den positiven.

Auf Grund dieser Ergebnisse konnte er jetzt seine Versuche anstellen. Er nahm mit Wasser gesättigte Luft, in der man also durch den Augenschein von der Anwesenheit von Wasser nichts bemerken kann, und ließ auf diese ein geeignetes Radiumpräparat wirken. Dann vergrößerte er plötzlich den Raum dieser Luft um den gewünschten Betrag. In dem gleichen Moment bildeten sich an den Jonen, die der

betreffende Strahl in seiner Bahn erzeugt hat, Wasserbläschen. Diese sind natürlich sofort sichtbar, vergrößern sich aber selbstverständlich ebenso rasch, und durch die neuen Strahlen bilden sich auch wieder neue, so daß nur eine unentwirrbare Nebelwolke vorhanden sein würde. Um nun etwas Brauchbares zu erhalten, ließ er im gleichen Augenblick, in dem die Ausdehnung der Luft vor sich ging, einen elektrischen Funken aufblitzen, bei dem man mit Leichtigkeit Lichtblitze von nur wenigen Hundertsteln bis Hunderttausendsteln einer Sekunde erzielen kann, und dieses Licht beleuchtet die „Wassertröpfchenstrahlen" (wenn man so sagen darf, um die Bahnen der im Augenblick vorher vorhanden gewesenen Radiumstrahlen zu bezeichnen). Auf die Stelle, wo die Wasserdampfkondensation eintrat, war ein photo-

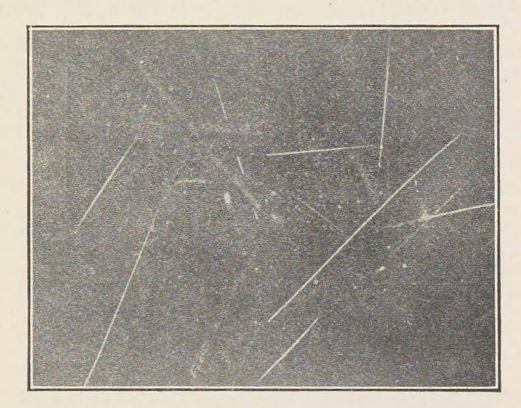


Abb. 30. Wilsonsche Aufnahme von α-Strahlen der Radiumemanation.

graphischer Apparat gerichtet, der das entstandene Gebilde auf der Platte festlegte.

Das war im Prinzip die Wilsonsche Anordnung; jeder Strahl hinterließ hinter sich eine Spur aus Nebelbläschen, und bevor diese sich fortbewegen oder vergrößern konnten, oder bevor neue Strahlen zu viel neue erzeugten, waren diese Nebelbläschen photographisch aufgenommen. Die Ergebnisse sollen die folgenden vier Abbildungen erläutern. Die erste Abb. 29 stellt die Photographie von α-Strahlen von Radium dar. Das Radiumpräparat, das sie aussendet, ist, wie man sofort sieht, außerhalb des Bereichs der Platte etwas rechts unterhalb gelegen, und die Strahlen pflanzen sich geradlinig fort. Fast alle enden sie mit einem kleinen Knick, da, wo ihr Vermögen, die Luft zu ionisieren, aufhört; das ist wohl so zu erklären, daß sie dort auf eine Luftmolekel treffen und dabei irgendwie zurückgeworfen werden.

Noch interessanter ist vielleicht die zweite Abbildung 30. Zu ihrer Herstellung war etwas Emanationsgas in den Ausdehnungsapparat hereingebracht worden. Hier geht also beim Zerfall dieses Stoffes und

bei der Aussendung der α-Partikelchen von den zerfallenden Atomen die Aussendung der α-Strahlen nicht von einem einzigen Punkt vor sich, sondern von den zufälligen Stellen der zerfallenden Atome. Die Strahlen liegen also ganz unregelmäßig durcheinander. Auf der ersten Aufnahme sieht man nur ganz scharfe Strahlen; das rührt daher, daß nur vom Augenblick der Ausdehnung der Luft bis zur Belichtung Jonen erzeugt werden konnten. Bei der zweiten Aufnahme sieht man auch einige mehr verwaschene Streifen, die von α-Strahlen herrührten, die schon ganz kurz vor der Ausdehnung entstanden, wo sich an die ursprünglichen Nebelbläschen schon neue anlagerten und den Streifen so verbreiterten.

Beide Photographien sind auf rund drei Viertel verkleinert reproduziert. Da die Anzahl der von α-Strahlen erzeugten Jonen sehr groß

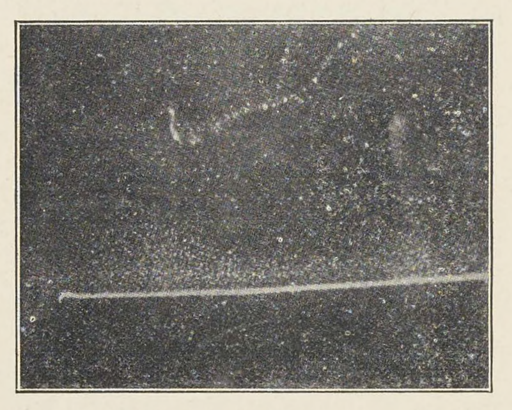


Abb. 31. Wilsonsche Aufnahme von β-Strahlen.

ist, sind die einzelnen nicht zu sehen. Man sieht also nur scharfe zusammenhängende Strahlen.

Anders wird es, wenn man β-Strahlen photographiert. β-Strahlen ionisieren die Luft ganz bedeutend weniger, erzeugen also auf der gleichen Wegstrecke wie ein α-Strahl viel weniger Jonen. Die Abb. 31 zeigt nun bei einer etwa 4fach vergrößerten Aufnahme unten einen α-Strahl, immer noch zusammenhängend, aber oben einen krummen β-Strahl. (Bei dem α-Strahl lasse man sich nicht dadurch stören, daß oberhalb von ihm eine Reihe Tröpfchen photographiert sind. Wilson hatte, um vor der Aufnahme alle störenden Jonen aus der Luft zu entfernen, das ganze zwischen die Platten eines Kondensators gebracht, und diese wirkten auch bei der Aufnahme weiter und haben hier eine große Zahl Jonen aus ihrer ursprünglichen Stelle herausgerissen, bis sich dann erst an ihnen Tröpfchen kondensierten.) Der β-Strahl erzeugt so wenig Jonen, daß man sie fast zählen kann. An seinem Ende, wo er am langsamsten geht, erzeugt er die meisten Jonen. Er wird im Gegensatz zu den α-Strahlen leicht durch die Luftmolekel aus

seiner Bahn abgelenkt; daher die vielfältigen Krümmungen. Zwischen diesem krummen β- und dem geradlinigen α-Strahl sieht man noch in der Mitte von rechts nach links einen fast geradlinigen zweiten, sehr schnellen β-Strahl, der also wenig Jonen erzeugt, verlaufen.

Die Abb. 32 zeigt endlich ebenfalls in etwa vierfacher Vergrößerung ein etwa 2 Millimeter breites, von links nach rechts verlaufendes γ-Strahlenbündel. Wir haben wohl früher gesagt, daß γ-Strahlen die Luft ionisieren, aber man ist heute zu der Auffassung gelangt, das es die γ-Strahlen nicht unmittelbar tun, sondern nur die β-Strahlen, die von der Stelle ausgehen, wo γ-Strahlen auf feste Wände, z. B. die Glaswände der Röhrchen, in denen sie erzeugt werden, oder auf Gasmolekel stoßen. Diese Annahme bestätigt die vorliegende Aufnahme aufs beste. Die erzeugten „Sekundärstrahlen" sind sehr langsame β-Strahlen, die unregelmäßig nach allen Richtungen ausgehen und wegen ihrer geringen Geschwindigkeit ganz regellos zerstreut werden. Man sieht deutlich, daß die eigentlichen γ-Strahlen, also das Gebiet der Platte, wo die wirren Linien am dichtesten verlaufen, gar nicht ionisieren. Die Zahl der erzeugten Jonen in den sekundären β-Strahlen ist, wie man sehen kann, recht gering. Nach einigen von Wilson vorgenommenen Zählungen schwanken sie von 150 bis etwa 2000 auf jedem Zentimeter des Weges.

IX. Kapitel.

Der Aufbau der Atome.

Das vorhergehende Kapitel hat sich im wesentlichen mit der Frage beschäftigt, wie groß die Anzahl der Atome in den einzelnen Körpern ist, wie die Ausschleuderung der einzelnen Atome und elektrischen Elementarquanten von den radioaktiven Körpern erfolgt, und wie man einzelne Atome mittelbar oder unmittelbar merkbar machen kann. In diesem Schlußkapitel wollen wir nun wenigstens einiges über die Vorstellungen mitteilen, die wir uns heute von dem Bau der Atome selbst machen, wir wollen uns weniger mit dem Atom als Ganzes beschäftigen, als mit seinen Einzelbestandteilen.

Da wird man sofort sagen, daß das doch der gesamten Auffassung von Atomen widerspricht. Ein Atom soll einheitlich, unteilbar sein. Wenn es noch teilbar wäre, wäre es doch kein Atom mehr. Da sei zunächst darauf hingewiesen, was wir schon früher über unsere Stellungnahme zu den radioaktiven Stoffen als Elementen gesprochen haben. Wir bemerkten dort, daß wir keine Veranlassung haben, diesen Stoffen den Charakter von Elementen, wie es andere Elemente sind, wie Gold, Quecksilber, Wasserstoff, abzusprechen. Nur in einem unterscheiden sie

sich von ihnen. Bei diesen Stoffen zerfällt, oder sagen wir einmal zunächst besser, ändert sich stets ein bestimmter Teil der Atome, aus denen sie aufgebaut sind. Die Atome, die sich nicht verändern, verhalten sich genau so wie die Atome anderer Elemente, die anderen sind natürlich im Augenblick der Veränderung wesentlich von ihnen verschieden. Sind sie aber in bestimmter Weise verändert, — und wir haben ja vielfach erwähnt, wie dieses geschieht, — so haben sie wieder den alten Atomcharakter, nur als Atom eines neuen Elementes.

Diese Veränderung geht ja so vor sich, daß die Atome neue Atome von sich ausscheiden oder Elektrizitätsatome abgeben.

Nachdem man einmal erkannt hat, daß solche Veränderungen in den Atomen selbst vor sich gehen können und auch ständig vorgehen, war es vielleicht nicht unmöglich, sie bei andern wohlbekannten Vorgängen, insbesondere in der Chemie, ebenfalls nachzuweisen. Und das ist z. B. auch Haber und Just gelungen. Sie schlossen etwa folgendermaßen: Wenn ein Atom Helium bei dem Zerfall des Radiums frei wird, oder wenn bei einer Umwandlung irgendeines radioaktiven Körpers in einen andern nur Elektronen ausgesandt werden, so zerfällt bei einem solchen Vorgang ein Atom bzw. eine Molekel. Wenn wir nun zwei Stoffe geeigneter Art aufeinander wirken lassen, so treten ja auch Zerfallserscheinungen in den wirkenden Molekeln ein. Werfen wir z. B. ein Stück metallisches Kalium auf Wasser, so greift das Kalium die Wassermolekel, die ja aus zwei Atomen Wasserstoff (H) und einem Atom Sauerstoff (O) besteht, an und zerteilt sie, die wir ursprünglich mit H_2O bezeichnen können, in die beiden Teile H und OH, und dann vereinigt sich ja ein Atom Kalium mit der Atomgruppe OH zu einer neuen Molekel KOH, während das Wasserstoffatom H frei bleibt, was sich durch eine Wasserstoffentwicklung beim Versuch zeigt. So tritt auch hier ein Molekelzerfall ein, der sogar mit merklichen Energieumsätzen verbunden ist, wie man aus Feuererscheinungen beim Versuch beobachten kann. Wenn man derartige geeignet erscheinende chemische Reaktionen genauer verfolgt, weshalb sollten dabei nicht auch Elektronenausstrahlungen auftreten? Haber und Just gelang es auch, tatsächlich solche aufzufinden, und zwar bei dem schon oben erwähnten Kalium und bei Natrium. Sie verwandten eine Kalium-Natriumlegierung, die flüssig war, und die sie in feinen Tröpfchen aus einem Vorratsbehälter in geeignete Gase austreten ließen. Sowie jene Legierung mit diesen in Berührung kommt,

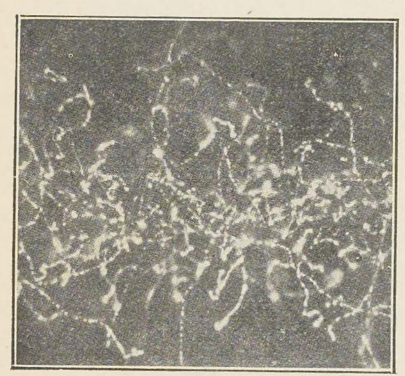


Abb. 32. Wilsonsche Aufnahme eines γ-Strahlenbündels.

tritt eine chemische Reaktion ein, indem das Gas auf sie einwirkt, und dabei werden Elektronen frei, die nach den üblichen Methoden nachgewiesen werden können. Man konnte überdies zeigen, daß sowohl ihre Ladungen, als auch ihre Geschwindigkeiten ganz den sonst bei Elektronen bekannten gleichkommen. Damit ist gleichzeitig festgestellt, daß die chemischen Reaktionen mit elektrischen Erscheinungen verbunden sind, und eine Erweiterung der Versuche kann noch manches wichtige Ergebnis liefern.

Auch bei einer ganz anderen Art von Vorgängen werden von einzelnen Stoffen ohne Mühe Elektronen abgegeben; es sei darauf wenigstens in aller Kürze hingewiesen. Wenn wir eine geeignet behandelte Zink-, Aluminium-, Kalium- usw. Fläche herstellen und diese negativ elektrisch aufladen, so wird sie unter normalen Umständen diese Ladung behalten, soweit sie sie nicht allmählich durch Leitung oder ähnliche Vorgänge verliert. Anders wird es aber, wenn wir solche Flächen im Dunkeln aufstellen, und plötzlich belichten, mit gewöhnlichem Licht, oder besser noch mit einer Lichtart, die für unser Auge schon nicht mehr einen Lichteindruck hervorruft, mit dem ultravioletten Licht, das im Spektrum bereits außerhalb des violetten Endes liegt und sich von dem gewöhnlichen Licht nur insofern unterscheidet, als seine Wellenlänge etwas kürzer ist, als die des gewöhnlichen sichtbaren Lichtes.

Wenn wir eine solche Fläche derart belichten, tritt sofort ein Ausschleudern von Elektronen ein, das langsam wieder aufhört, es tritt eine lichtelektrische Ermüdung ein. Das Ganze bezeichnet man als photoelektrische Erscheinungen. Auch von glühenden Stoffen, glühenden Metallen und Flammen werden leicht Elektronen ausgesandt.

Es ist also die Erscheinung der „normalen Radioaktivität" im Vergleich zu der „künstlichen Radioaktivität" nichts sonderlich Bemerkenswertes. Derartige Umsetzungen in den Atomen, allerdings nur in Formen von ausgesandten β-Strahlen, kommen also recht häufig in der Natur vor.

Wenn wir uns nun einmal damit beschäftigen wollen, wie denn ein Atom eines bestimmten Elementes aussieht, so müssen wir uns nach allem, was wir von ihm wissen, zunächst darüber klar sein, daß es kein einfaches Gebilde ist. Ein bekannter amerikanischer Physiker hat das einmal so ausgedrückt, daß er sagt, ein modernes Konzertklavier sei im Vergleich zu einem Atom ein einfacher Mechanismus. Wir können unsere heutigen Vorstellungen von dem Atom vielleicht so zusammenfassen: Jedes Atom besteht aus einer materiellen Masse, mit der gleichzeitig eine bestimmte Menge positiver Elektrizität fest und unlöslich verbunden ist. Innerhalb dieser Masse verteilt oder um sie herumgruppiert befinden sich eine Anzahl Elektronen, die um sie herumkreisen oder Schwingungen ausführen. Je nach ihrer Anzahl ist die Menge positiver Elektrizität bemessen, derart, daß sie

durch die Elektronen, also negative Elektrizität in Elementarladungen, gerade neutralisiert wird.

Im Zusammenhang mit Berechnungen der mehrfach erwähnten Loschmidtschen Zahl kann man auch rechnerisch feststellen, wie groß etwa ein Atom ist (vgl. S. 79). Man erhält dafür etwa Werte von $1 \cdot 10^{-6}$ Millimeter bis $1 \cdot 10^{-7}$ Millimeter, d. h. ein Atom hat, wenn man es als eine Kugel ansieht, einen Durchmesser von einem Millionstel Millimeter oder noch weniger. Und wenn man die Elektrizitätsmenge eines Elektrons auf eine Kugel beschränkt sich vorstellt, so kann diese nur etwa $1 \cdot 10^{-12}$ Millimeter Durchmesser haben. Also Hunderttausend oder eine Million Elektronen nebeneinandergelegt machen erst den Durchmesser einer Atomkugel aus. Wie man diese Zahlen für ein Elektron berechnen kann, sei hier nicht weiter behandelt.

Über die positive Elektrizität wissen wir recht wenig, wenn nicht gar nichts. Wir wissen nur, daß sie irgendwie mit der materiellen Masse verbunden ist, und daß wir sie von ihr nicht abtrennen können. Positive Elektronen sind niemals gefunden worden.

Wie viele Elektronen ein Atom hat, wissen wir auch nicht. Man hat Gründe zu der Annahme, daß es je nach dem Atomgewicht des Stoffes eine verschiedene Anzahl ist. Gelegentlich ist erwähnt, daß die α-Strahlen des Radiums Heliumatome mit doppelter positiver Elementarladung sind, mit andern Worten, daß von jedem neutralen Heliumatom zwei Elektronen beseitigt sind. Wahrscheinlich sind nun alle Elektronen in diesem Fall beseitigt, so daß keine mehr abgespalten werden können. Helium hat das Atomgewicht 4 und besitzt normalerweise also in jedem Atom $2 = {}^4/_2$ Elektronen. Ebenso ein Element von dem Atomgewicht 100 etwa ${}^{100}/_2 = 50$ Elektronen usw. Es kommen also dabei teilweise, besonders bei den radioaktiven Stoffen mit ihren hohen Atomgewichten von über 200, recht beträchtliche Elektronenzahlen heraus. Andere Forscher stehen allerdings auch auf dem Standpunkt, daß die Elektronenzahl im Atom angenähert dem Atomgewicht gleich oder sogar doppelt so groß ist.

Es ist vielfach versucht worden, diese Gruppierungen der Elektronen, die natürlich dadurch bedingt sind, daß sie alle von der positiven Elektrizität angezogen werden, und, da sie selbst alle gleichartig elektrisch sind, sich gegenseitig abstoßen, künstlich, bzw. rechnerisch darzustellen, oder, wie man es auch ausdrückt, ein Atommodell zu konstruieren. Das bekannteste solcher Atommodelle stammt von J. J. Thomson. Es ist eine leichte Mühe, selbst experimentell etwas Ähnliches, wie er es ausgeführt hat, nachzubilden. Man nehme eine Anzahl Eisenstäbchen gleicher Art, also Nähnadeln oder Stücke von Stricknadeln, und magnetisiere alle gleichmäßig. Sodann stecke man sie derart in Korkstückchen, daß sie auf Wasser senkrecht schwimmen, und alle die gleichen Pole nach oben kehren. Selbstverständlich werden sie sich dann möglichst weit voneinander zu entfernen versuchen, da sie alle einander abstoßen. Anders wird es aber, wenn man oberhalb

einen Magneten anbringt, der sie wieder anzieht; dann werden sie sich so einstellen, daß die Anziehungs- und Abstoßungskräfte sich gerade das Gleichgewicht halten. Die Kombinationen fallen verschieden aus, je nach der Anzahl der schwimmenden Magnete. Vier werden sich z. B. in einem Quadrat anordnen, fünf in einem regulären Fünfeck oder vier von ihnen in einem Quadrat und das fünfte in der Mitte usw.

Auf Grund solcher Versuche stellte Thomson sein Atommodell auf. Er fand, daß sich um die positive Ladung die Elektronen in Ringen ordnen werden, deren Mittelpunkte mit dem Atommittelpunkte zusammenfallen werden. Bei fünf Elektronen bildet sich nur ein Ring, bei sechs bilden fünf den Ring, eines befindet sich in der Mitte; 17 bilden drei Ringe, 49 schon fünf, usw.

Im Anschluß an derartige Berechnungen konnte auch Thomson allgemeine chemische Eigenschaften derart aufgebauter Stoffe ableiten, und diese entsprechen auch den bekannten Eigenschaften der uns wohlvertrauten Elemente. Ob nun ein solches Modell der Wirklichkeit entspricht, kann man natürlich nicht angeben. Interessant ist dabei jedenfalls, daß es möglich ist, auf Grund solcher Modelle Eigenschaften bekannter Stoffe allgemeiner Art zwingend abzuleiten, die auch praktisch sich bestätigen.

Man sieht also, daß ein Atom, von dem wir wenigstens über seinen Aufbau, soweit er aus Elektronen besteht, einiges wissen, recht komplizierter Gestaltung ist. Die Elektronen sind überdies in dem Atom noch in ständiger Bewegung, kreisend oder schwingend. Ihre Bewegung überträgt sich auf den Lichtäther, setzt diesen in Bewegung, und dessen Schwingungen, Wellenbewegungen, merken wir als Licht, insbesondere im Spektralapparat, wo wir die Vibration der Elektronen als Spektrallinien sehen. Diese Theorie ist so kompliziert, daß wir uns ein Eingehen auf sie versagen müssen. Wie es mit dem positiven Teil eines Atoms steht, wissen wir nicht. Über seinen Aufbau vermögen wir mit einiger Sicherheit nichts zu sagen.

Einen interessanten Einblick in die Welt der Atome geben uns besonders die Untersuchungen an den α- und den γ-Strahlen. Jene, insbesondere die von Stark, Lenard usw., zeigen, daß die Atome nicht sehr zusammenhängende, lockere Gebilde sein können. Es ist möglich, daß die geladenen Atome der α-Strahlen, die in Bewegung sind, also mit etwa $^1/_{20}$ Lichtgeschwindigkeit durch den Raum fliegen, andere Atome einfach durchdringen, ohne sie in Bewegung zu setzen. Und die Untersuchung der γ- oder Röntgenstrahlen, wie sie von Laue begonnen und zur Untersuchung der Materie von den beiden Bragg, Vater und Sohn, fortgesetzt wird, gibt uns über den Aufbau der Atome der einzelnen Körper und die Bewegung der Atome in den materiellen Stoffen weitreichende Aufschlüsse.

Die Kombinationen der Elektronen und der positiven Kerne geben die uns bekannten Elemente, einige 80 der gewöhnlichen Art und die etwa dreißig radioaktiven. Sind diese nun wirklich so verschieden

untereinander, besteht der alte Traum der Alchemisten, alle Elemente aus einem ableiten zu können, wirklich so ganz zu unrecht? Bei den radioaktiven haben wir schon etwas Ähnliches sich selbsttätig vollziehen sehen. Sollte es bei den anderen nicht auch möglich sein? Gelungen ist es bisher noch nicht. Interessant ist aber, daß es nicht ganz aussichtslos erscheint. Das Thomsonsche Modell der Atome hat uns dazu, theoretisch wenigstens, Möglichkeiten offen gelassen. An dieses Modell knüpft nun Nicholson mit seinen Spekulationen an. Er nimmt die Existenz von nur vier Urelementen an, von denen drei alle anderen zusammenzusetzen gestatten. Deren notwendige Eigenschaften leidet er im Anschluß an das Thomsonsche Modell ab. Diese Elemente sind keine Phantasiegebilde, wie es den Anschein hat, sondern sie sollen wirklich in der Natur vorkommen. Das eine soll das Coronium sein, dessen Spektrum in der Sonnenatmosphäre bekannt ist, sodann der Wasserstoff, drittens das Nebulium, ein allerdings noch sehr hypothetisches Element, dessen Spektrum in den Nebelflecken zu finden ist, und endlich das Protofluor, das ebenfalls in der Sonnenatmosphäre vorhanden sein soll.

Er berechnete dann die Atomgewichte dieser Elemente, die sich zu 0,513 für Coronium, zu dem bekannten Wert von 1,008 für Wasserstoff (H), 1,6277 für Nebulium (Nb) und 2,3607 für Protofluor (Pf) ergaben. Es gelingt dann, die Atomgewichte aller bekannten Elemente als die Summe verschiedener ganzer Vielfache der letzten drei Elemente darzustellen. So z. B.

			Atomgewicht berechnet	Atomgewicht beobachtet
Helium (He) . . .	=	1 Nb + 1 Pf	3,988	3,99
Lithium	=	1 He + 3 H	7,01	6,94
Beryllium	=	3 Pf + 2 H	9,097	9,10
Bor	=	2 He + 3 H	11,00	11,00
Kohlenstoff	=	2 He + 4 H	12,008	12,00
Stickstoff	=	2 He + 6 H	14,02	14,01
Sauerstoff	=	3 He + 4 H	15,996	16,00
Fluor	=	3 He + 7 H	19,020	19,00
Natrium	=	4 He + 7 H	23,008	23,01
Magnesium	=	2 H + 5 He + 5 Pf	24,32	24,32
Argon	=	10 He	39,88	39,88

Eine derartige Übereinstimmung wird gerade bei diesen leichten Elementen kaum noch als Zufall anzusehen sein. Bei Elementen mit hohem Atomgewicht würde sie weniger beweisend sein, da man durch geeignete Auswahl der einzelnen Vielfachen der drei in Frage kommenden Stoffe wohl leicht eine gegebene große Zahl mit guter Annäherung wird erreichen können.

Aber damit nicht genug. Diese Theorie fand noch eine eigenartige Stütze, indem sich durch sie berechnen ließ, welche Spektral-

linien das Element Nebulium zeigen müßte, und sie ergaben sich tatsächlich als identisch mit den astronomisch bereits bekannten. Eine vorausgesagte Linie war wohl nicht aufgefunden, aber sie fand sich noch auf einer älteren photographischen Aufnahme, wo sie infolge ihrer Schwäche nicht beachtet war.

Endlich erwiesen sich auch 16 Linien des Spektrums der Sonnenkorona mit den berechneten Linien für Protofluor identisch.

Es ist ein sehr interessanter Versuch, die Lösung der Frage des Aufbaues der Atome, wie ihn Nicholson hier gegeben hat, mit seiner Zurückführung aller Elemente auf vier. Ein solches Atommodell, das uns die Eigenschaften eines Atoms voraussagen läßt, ist natürlich die vollständige Lösung dieser Frage. Ob dieses Nicholsonsche es ist, bleibt abzuwarten. Eine kleine Wahrscheinlichkeit dafür ist wohl vorhanden. Auch dann aber muß man berücksichtigen, daß es in den Naturwissenschaften bisher noch kein Problem gibt, das restlos gelöst ist.

Druck von Hallberg & Büchting (Inh.: Alfred Klepzig), Leipzig.

